



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES**

Facultad de Ciencias e Ingeniería

**MODELO DE GESTIÓN PARA EL MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS EN REDES
DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2015**

PROTOCOLO INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD DE
MANIZALES

Facultad de Ciencias e Ingeniería

**MODELO DE GESTIÓN PARA EL MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS EN REDES
DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Magister en Tecnologías de la Información Geográfica

Presidente

ALBERTO BOADA RODRIGUEZ

M Sc. Geoinformation Systems for Urban Applications

Especialista en Teledetección

Ingeniero Industrial- Estadístico

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2015**

PROTOCOLO INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

“A mi esposa Wendy y mi hijo Daniel, por ser el pilar de mis sueños”

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Alberto Boada Rodríguez, M Sc. in Geoinformation Systems for urban Applications, Oficina CIAF, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Asesor del proyecto.

Sergio Alonso Anaya Estévez, Ingeniero de Sistemas, Profesional División de Distribución – Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Asesor en Bases de Datos y Sistemas de Información Geográfica.

CRÉDITOS

Las personas que participaron en este proyecto fueron las siguientes:

NOMBRE COMPLETO	FUNCIÓN EN EL PROYECTO	DIRECCIÓN DE CONTACTO	CORREO ELECTRÓNICO
Luis Fernando Castañeda Galvis	Autor	Calle 19 No 32-59 Apto 804, San Alonso, Bucaramanga	luisfernandocasta@yahoo.com
Alberto Boada Rodríguez	Presidente	Carrera 30 No 48-51	aboadar@gmail.com
Sergio Alonso Anaya Estévez	Asesor Bases de Datos	Calle 20 No 32ª.59 Apto 803	sanaya@amb.com.co

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

**ALBERTO BOADA RODRIGUEZ
JURADO**

**JOSÉ FERNANDO MEJIA CORREA
JURADO**

**LUIS CARLOS CORREA ORTIZ
JURADO**

Manizales, 20 de Junio de 2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	22
2. OBJETIVOS.....	24
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3. JUSTIFICACIÓN.....	25
4. MARCO TEÓRICO	26
4.1 GEOESTADÍSTICA Y ESTADÍSTICA ESPACIAL: CONCEPTOS CLAVE.....	26
4.1.1 Definición de Geoestadística.....	26
4.1.2 Autocorrelación o dependencia espacial.	26
4.1.3 Detección y medición de la Autocorrelación espacial.	27
4.1.4 Matriz de contigüidad o pesos espaciales.	28
4.1.5 Relaciones de interdependencia espacial.....	29
4.2 ANÁLISIS DE PUNTOS CALIENTES (HOT SPOTS ó GETIS-ORD)	32
4.2.1 Prueba de autocorrelación espacial local con G_i^*	33
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO BAYESIANO	35
4.3.1 Conceptos en Estadística Bayesiana.	35
4.3.2 Formulación del análisis.....	37
4.4 CONFIABILIDAD HIDRÁULICA.....	39
4.4.1 Definición Tentativa.	40
4.4.2 Indicadores de confiabilidad	40
4.4.3 Resiliencia como indicador de confiabilidad.	41
4.4.4 Resiliencia vs costo y presión.....	42
4.5 ANTECEDENTES.....	43
4.5.1 Estadísticos G para evaluar la autocorrelación espacial.....	43
4.5.2 Aplicación de Estadísticos G a los daños en tuberías.	44
4.5.3 Estadística bayesiana en un análisis de fallo en tuberías de gas.	44
4.5.4 SIG y estadística Bayesiana en rehabilitación de alcantarillados.	44
4.5.5 Uso de estadística Bayesiana en renovación de redes de acueductos.	45
4.5.6 Diseño y optimización de redes a través del índice de Resiliencia.	45
5. METODOLOGÍA.....	46
5.1 TIPO DE TRABAJO	46
5.2 PROCEDIMIENTO	46
5.2.1 Fase 1. Recolección y Organización de Información.....	46
5.2.2 Fase 2. Determinación de los tipos de daño significativos.....	48
5.2.3 Fase 3. Test de Autocorrelación espacial G_i^* y Ranking de distritos.	48
5.2.4 Fase 4. Análisis estadístico Bayesiano y análisis de confiabilidad.	49
6. RESULTADOS	51
6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	51

6.1.1 Fase 1.....	51
6.1.2 Fase 2.....	52
6.1.3 Fase 3.....	53
6.1.4 Fase 4.....	61
6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
7. CONCLUSIONES.....	82
7.1. Con respecto a la información geográfica del amb S.A. ESP	82
7.2. Con respecto al modelo de gestión de mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable	82
7.3. Con respecto a la conceptualización de relaciones espaciales	82
7.4. Con respecto al análisis de puntos calientes	83
7.5. Con respecto al ranking cuantitativo de los distritos hidráulicos	83
7.6. Con respecto al análisis estadístico bayesiano.....	83
7.7. Con respecto al análisis de confiabilidad	83
7.8. Con respecto a los planos de presiones y a las tuberías a optimizar.....	84
7.9. Con respecto a la presión promedio y a la uniformización de presiones	84
8. RECOMENDACIONES	85
8.1 Con respecto a la aplicación de la metodología	85
8.2 Con respecto a la información geográfica del amb S.A. ESP	85
8.3 Con respecto a la conceptualización de relaciones espaciales	85
8.4 Con respecto al análisis de puntos calientes	85
8.5 Con respecto al análisis estadístico bayesiano	85
8.6 Con respecto al análisis de confiabilidad.....	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación modelos de mejoramiento de redes de distribución.....	20
Figura 2. Tipos de Autocorrelación espacial	27
Figura 3. Relación de distancia Inversa	30
Figura 4. Relación de Banda de distancia	30
Figura 5. Relación de Zona de indiferencia	31
Figura 6. Tipos de Contigüidad entre polígonos	31
Figura 7. Test del puntaje $Z(G_i^*)$	34
Figura 8. Diagrama de Venn Eventos en la Ley de Probabilidad Total.....	36
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología propuesta	47
Figura 10. Funcionamiento de la herramienta <i>Collect Events</i>	49
Figura 11. <i>Shapefile</i> de daños 2006 – 2013.	51
Figura 12. Histograma de Pareto Daños año 2013.....	53
Figura 13. Agrupamiento de daños - año 2013.....	54
Figura 14. Autocorrelación espacial vs distancia de Banda - Daños 2013	55
Figura 15. Niveles de confianza para la existencia de <i>Hot/Cold-Spots</i>	56
Figura 16. Resumen Análisis <i>Hot-Spots</i> para los daños año 2013.....	56
Figura 17. Visualización de G_i^* para los <i>clusters</i> creados – año 2013	57
Figura 18. Distritos Estadio, Morro Alto y Norte	58
Figura 19. Visualización gráfica de la clasificación cuantitativa de los distritos según el resultado promedio de ZG_i^* por distrito y la normalización de los eventos correlacionados espacialmente.....	60
Figura 20. Vista general de tuberías de la red de distribución	61
Figura 21. Vista general de tuberías y distritos de la red de distribución	62
Figura 22. Distrito Morro Alto	63
Figura 23. Eventos de daño en la red de distribución año 2013	64
Figura 24. Distribución de Probabilidades de Daño - Distrito Morro Alto	67
Figura 25. Mapa de probabilidades de Daño - Zona Norte Distrito Morro Alto	68
Figura 26. Mapa de probabilidades de Daño - Zona Sur Distrito Morro Alto.....	69
Figura 27. Modelo Hidráulico de la red del distrito Morro Alto – Epanet	70
Figura 28. Ir vs Número de cambios - Morro Alto	71
Figura 29. Costo acumulado de renovación vs Número de cambios –Morro Alto	71
Figura 30. Presión promedio vs Número de cambios –Morro Alto.....	72
Figura 31. Costo agua fugada anual vs Número de cambios –Morro Alto.....	73
Figura 32. Mapa de prioridades por Confiabilidad - Zona Norte Morro Alto.....	74
Figura 33. Mapa de prioridades por Confiabilidad - Zona Sur Morro Alto	75
Figura 34. Distribución de presiones antes y después de realizar el análisis de confiabilidad	76
Figura 35. Planos de presiones del distrito Morro Alto- Antes y después de realizar el análisis de confiabilidad	76

Figura 36. Disminución de la presión promedio en el distrito Morro Alto y uniformización del plano de presiones después del análisis de confiabilidad77
Figura 37. Presiones antes y después del análisis de confiabilidad - Morro Alto...95

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipo de dato de los atributos mínimos	48

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Componentes del modelo de gestión propuesto	21
Cuadro 2. Atributos asignados en diferentes años	52
Cuadro 3. Tipos de daños significativos	52
Cuadro 4. Clasificación cuantitativa de los distritos según el resultado promedio de ZGi * por distrito y la normalización de los eventos correlacionados espacialmente	59
Cuadro 5. Características consideradas para el análisis Bayesiano.....	64
Cuadro 6. Probabilidades a priori no condicionales - Morro Alto – año 2013	65
Cuadro 7. Probabilidades a priori Condicionales - Morro Alto – año 2013.....	65
Cuadro 8. Probabilidades de falla Condicionales – Distrito Morro Alto	66
Cuadro 9. Distribución de Probabilidades de Daño - Distrito Morro Alto.....	66
Cuadro 10. Tipos de daños significativos	78
Cuadro 11. Distribución de Probabilidades de Daño - Distrito Morro Alto.....	79
Cuadro 12. Listado de cambios por confiabilidad hidráulica - Morro Alto	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Análisis De Confiabilidad Hidráulica.....	90
ANEXO B Resultados Análisis De Confiabilidad Hidráulica.....	94
ANEXO C Resumen Analítico.....	96

GLOSARIO

Acueducto: Sistema de abastecimiento de agua para una población.

Agua potable: Es aquella que cumple características, físicas, químicas y microbiológicas que la hacen apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal y no produce efectos adversos en la salud humana.

Altura piezométrica: Altura a la que se elevaría el agua en un tubo piezométrico colocado en un punto de una conducción.

Autocorrelación espacial: De manera simple, es la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa. Refleja el grado en que los objetos o actividades en una unidad geográfica son similares a otros objetos o actividades en unidades geográficas próximas.

Banda de distancia: Es un tipo de relación de interdependencia espacial que define a los vecinos de una unidad geográfica (punto o área), como aquellos que caen dentro de una distancia límite a la unidad. El peso de la relación entre la unidad y cualquier vecino dentro de la distancia límite es constante. No existe peso de la relación entre la unidad geográfica y unidades por fuera de la distancia límite.

Base de datos: Conjunto de información que se almacena bajo esquemas particulares para su posterior consulta y análisis.

Catastro de redes: Sistema de registro y archivo de información técnica estandarizada y relacionada con todos los detalles técnicos de ubicación de tuberías, diámetros, válvulas, hidrantes y todo accesorio de la red.

Confiability: Probabilidad de buen funcionamiento de una cosa.

Cluster: Es una colección de objetos que son similares entre sí.

Clustering: Es la división de datos en grupos de objetos similares (Clusters).

Distrito Hidráulico: Es una región o sector de la red de tuberías que puede operar aisladamente.

Entidad o unidad Geográfica: Es una representación de cosas ubicadas en la superficie de la tierra o cercanas a ella (ríos, divisiones políticas, carreteras,

pozos, estaciones hidrométricas, edificios, etc). Se representan comúnmente como puntos, líneas o polígonos.

Estadístico Getis-Ord (G_i^*) o Análisis de puntos calientes: Medida que sirve para detectar la existencia o no de autocorrelación espacial mediante la evaluación de *clusters* de valores altos (puntos calientes) y valores bajos (puntos fríos)

Estadística Inferencial: Parte de la estadística por medio de la cual se llega a conclusiones acerca de una población con base en la información que se obtiene a partir de una muestra seleccionada de esa población.

Fugas: Cantidad de agua que se pierde en un sistema de acueducto por accidentes en la operación, tales como rotura o fisura de tubos, rebose de tanques, o fallas en las uniones entre las tuberías y los accesorios.

Estadística espacial: Es una disciplina de la estadística general que trata el análisis descriptivo e inferencial de datos geográficos.

Georreferenciación: Acción de ubicar uno o varios puntos a partir de un grupo de puntos semejantes previamente localizados.

Hipótesis nula: En inferencia estadística, es la hipótesis que se desea aceptar o refutar, mediante una prueba de contraste de hipótesis. Para el caso del test de autocorrelación espacial, la hipótesis nula es que la variable medida se encuentra distribuida de forma aleatoria en el espacio.

Histograma: Representación gráfica de una variable en la que el eje horizontal representa unidades discretas, ciertos rangos, o intervalos, en tanto que el eje vertical representa la frecuencia.

Hot-spot (Punto caliente): *Cluster* de entidades geográficas con altos valores.

Cold-Spot (Punto frío): *Cluster* de entidades geográficas con bajos valores

Índice de agua no contabilizada: Indicador porcentual que relaciona el volumen total de agua que se suministra a las redes con el volumen total de agua que se factura a los suscriptores de éstas, en un período determinado.

Índice de resiliencia: Indicador de confiabilidad de una red de tuberías. Relaciona la potencia por unidad de peso de operación real y la potencia por unidad de peso de operación óptima del sistema de distribución con el fin de establecer el grado de eficiencia de entrega del servicio dada una configuración de tuberías.

Mantenimiento correctivo: Mantenimiento que se hace en algún componente del sistema de acueducto como reacción a una falla o daño.

Mantenimiento preventivo: Mantenimiento que se hace en algún componente del sistema de acueducto a partir de un programa previo, para evitar que el sistema presente una falla o daño.

Mantenimiento: Conjunto de acciones que se ejecutan en las instalaciones y/o equipos para prevenir daños o para la reparación de los mismos cuando se producen.

Red de distribución: Conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta los puntos de consumo.

Sistema de información geográfico: Sistema que integra tecnología informática e información geográfica cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

Tecnologías de información: Término que agrupa todo lo relacionado con la computación, programas, comunicaciones y equipos que sirven para administrar y analizar las grandes cantidades de información que el mundo moderno usa a diario.

Teorema de Bayes: Proposición planteada por el filósofo inglés Thomas Bayes, que expresa la probabilidad condicional de un evento aleatorio A dado B en términos de la distribución de probabilidad condicional del evento B dado A y la distribución de probabilidad marginal de sólo A.

Tubería: Ducto de sección circular para el transporte de agua.

RESUMEN

Se expone una metodología para el mantenimiento y renovación de tuberías de manera proactiva y eficiente a partir de información geográfica y registro de daños de las redes de distribución; mediante la implementación y alineación de tres modelos de mejoramiento: dos modelos estadísticos y un modelo de análisis técnico del sistema.

El primer modelo (estadístico) usa la información geográfica y el registro de daños del total de la red de tuberías de una Ciudad. Es el componente macro y de mayor importancia de la metodología. Mediante un análisis de estadística espacial de Puntos Calientes (*Hot-spots*), aplicando la relación de interdependencia espacial de distancia de banda; se averigua la autocorrelación espacial de los daños, para con ello precisar los distritos hidráulicos que contienen, relativamente, mayor cantidad de puntos calientes. Así, en primera instancia, se establece un *Ranking* de distritos en donde se identifica la prioridad de mantenimiento y renovación.

Seguidamente se incorpora para el(los) distrito(s) prioritarios un modelo estadístico fundamentado en un análisis bayesiano, donde a partir del registro de daños del distrito, se predicen probabilidades de daño de cada tubería, según características que se observen en la misma: diámetro, edad, material y longitud.

Finalmente se incorpora, también para el(los) distrito(s) prioritario(s), un modelo de análisis técnico del sistema, donde a partir del modelo hidráulico se prioriza la renovación de aquellas tuberías que de manera óptima mejoran la confiabilidad hidráulica de la red, cuidando simultáneamente del costo y la presión.

Se aplica la metodología a la Ciudad de Bucaramanga cuya red de distribución está subdividida en 39 distritos hidráulicos. Del análisis de *Hot-Spots*, se observa siempre los mismos 4 distritos prioritarios. Se elige cualitativa y cuantitativamente el más prioritario para implementar los dos modelos subsiguientes, y así se direcciona el mantenimiento a 2.3 kilómetros de tuberías, correspondientes al 3.5% de la red de tuberías del distrito.

PALABRAS CLAVES: Redes de distribución de Agua, Daños, Sistema de Información Geográfica, Mantenimiento Proactivo, Análisis de Puntos Calientes, Teorema de Bayes.

ABSTRACT

Is exposed a methodology for maintenance and renovation of pipelines in a way proactive and efficient based on geographic information and damages database at distribution networks; through implementation and alignment of three models of improvement: two statistical models and a model of system technical analysis.

The first model (statistical) uses geographic information and damages database of entire distribution network of a City. It's the macro and most important component of the methodology. By means hotspots analysis, applying band distance interdependence relationship, spatial autocorrelation is probed and thus are determined those hydraulic districts which relatively contains greater quantity of hotspots. Thus, in first place a ranking of hydraulic districts is set in order to identify priority of maintenance and renovation.

Next for priority districts a statistical model based on a Bayesian analysis is incorporated, when from damages database of district, are predicted damage's probabilities for each pipeline, according to some characteristics that are observed: diameter, age, material, and length.

Finally also for priority districts is incorporated a model of system technical analysis, when from a hydraulic model the renewal is prioritized to those pipelines that in optimal way improve hydraulic reliability of network, taking care cost and pressure simultaneously.

The methodology is applied to Bucaramanga City whose distribution network is divided into 39 hydraulic districts. From hotspot analysis, four districts are always seen as the most priority. Then is chosen qualitatively the highest priority in order to implement the following two models, and so the maintenance is addressed to 2.3 kilometers of pipelines corresponding to 3.5% of the entire pipelines of district.

KEY WORDS: Water Distribution networks, Failures, Geographical Information System, Proactive Maintenance, Hot-Spot Analysis, Bayes' Theorem.

INTRODUCCIÓN

Un sistema de distribución de agua potable puede ser definido, de acuerdo con Watson¹, como un conjunto de tuberías, tanques de almacenamiento, bombas, válvulas y conexiones, que en conjunto sirven de medio para abastecer y distribuir agua potable a una serie de usuarios finales del sistema.

El suministro de agua potable a la población se efectúa a través de una infraestructura compleja, que crece en muchos casos de manera desordenada y que a su vez envejece, desarrollando procesos naturales de deterioro y daños en el sistema. Watson (2001) señala que: “El envejecimiento de la infraestructura, el crecimiento de la población y el capital limitado hace que sea necesario implementar metodologías rigurosas y robustas para la toma de decisiones en la priorización y renovación de tuberías, de manera que se direccionen de una manera más apropiada la inversión de recursos económicos”².

Guzmán et al (2010)³ expresan que los desafíos más grandes para las empresas prestadoras del servicio de acueducto, se encuentran asociados a los daños en las tuberías y a la localización de fugas no visibles dentro de las redes de distribución. Por lo tanto, encontrar qué tuberías necesitan renovación, teniendo en cuenta que los costos de reparación sean mayores a los de remplazo, es una tarea difícil.

Se puede decir de acuerdo a las anteriores citas, por ejemplo, que la renovación de redes es una práctica asociada a la solución de varios problemas. Infraestructuras deterioradas en sistemas de distribución de agua pueden provocar pérdidas por fugas, disminución de la capacidad de transporte de agua, fallas en los componentes del sistema (tuberías, bombas, válvulas entre otros), elevación en los costos de mantenimiento y operación, deficiencia en la calidad del fluido, constantes interrupciones en el servicio y disminución de la confiabilidad. Esos factores demuestran que la mejoría de esas infraestructuras, a pesar de ser necesaria, no es tarea para nada fácil pues los objetivos son múltiples y en buena parte conflictivos.

¹ WATSON, Tim, et al. Maintenance of water distribution systems. En Proceedings of the 36th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, University of Canterbury, New Zealand. 2001. p. 57.

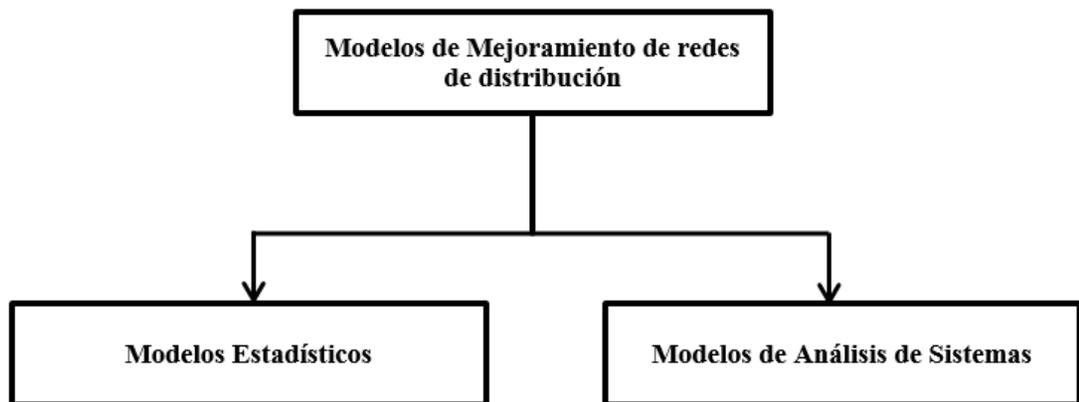
² *Ibíd.*, p. 57

³ GUZMAN, A., & DANIEL, C. (2010). Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto.(México) (Doctoral dissertation) p. 3, 10.

El objetivo del mejoramiento proactivo de redes, debe ser entonces encontrar formas óptimas de inversión que eleven el nivel de prestación del servicio mediante el establecimiento de objetivos particulares con base en la necesidad y/o importancia actual y futura de los mismos.

Los modelos o metodologías de mantenimiento, mejoramiento y/o rehabilitación de redes de distribución (que son implementados dentro de programas marco de mantenimiento o rehabilitación) existentes en la literatura, pueden ser clasificados en dos grupos de acuerdo a como se muestra en la Figura 1. El primer grupo de metodologías busca rehabilitar o mejorar componentes individuales de la red sin preocuparse por el análisis hidráulico del sistema y es basado en técnicas estadísticas. En el segundo grupo se busca identificar los componentes de la red que deben ser mejorados considerando la evaluación hidráulica del sistema y son basados en técnicas de análisis de sistemas.

Figura 1. Clasificación modelos de mejoramiento de redes de distribución.



Fuente: Adaptado de CHEUNG, Peter B. (2004) Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo. Trabajo de grado (Doctor en Hidráulica y Saneamiento). Universidad de São Paulo, p.31.

El presente trabajo desarrolla un modelo de gestión para priorizar el mantenimiento de manera proactiva, mediante la implementación de dos modelos de estadísticos (Estadística espacial y análisis bayesiano) y un modelo de análisis técnico del sistema.

Cuadro 1. Componentes del modelo de gestión propuesto

“Modelo de gestión para priorizar el mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable”		
Análisis de Estadística Espacial	Análisis Estadístico Bayesiano	Análisis de Confiabilidad hidráulica
Establecer un <i>Ranking</i> de distritos hidráulicos con base en análisis de puntos calientes <i>Hot-spots</i>	Estimar probabilidades de fallo con base en el teorema de Bayes.	Estimar prioridades de renovación de con base a un análisis de resiliencia.

Fuente: El Autor.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS* establece (Título B, numeral 7.11.11) el uso de tecnologías de información para las labores de mantenimiento de la red de distribución de acueductos. En general se establece que las operaciones de mantenimiento (se puede extender a las operaciones de renovación) en los niveles de complejidad medio alto y alto; se deben apoyar en Sistemas de Información Geográfica y programas de diseño hidráulico. No obstante lo anterior, aún no se determinan en Colombia modelos o metodologías de renovación y mantenimiento precisas reglamentadas para ejecutar en la red de distribución. Adicionalmente parece no haber restricción en cuanto al tipo de mantenimiento o renovación (correctivo, preventivo o predictivo) que debe implementarse en la redes de distribución de los sistemas medio alto y alto. Lo que sí existe es en general, como ya se dijo; la obligación de hacer uso intensivo de los sistemas de información geográfica para sistemas de tales niveles de complejidad.

Los programas de mantenimiento y/o renovación de redes de tuberías, cuya justificación resulta trivial, pueden clasificarse en tres tipos⁴: Programas correctivos, programas preventivos y programas predictivos. Un programa correctivo, denominado también de emergencias, es un programa reactivo que se realiza cuando fallan los elementos del sistema en condiciones normales de funcionamiento y se caracteriza por la inhabilidad de programar, planear y presupuestar el trabajo. Un programa preventivo, es un programa no reactivo claro de actividades de mantenimiento, las cuales esperan un mejoramiento en el comportamiento del sistema y se caracteriza por ser planeado, programado y presupuestado, así como por ser optimizador de recursos humanos. Un programa predictivo, es un programa no reactivo que establece una línea base con valores de desempeño del sistema en la que se puede observar cualquier variación en el desempeño en un periodo de tiempo. Asimismo, se pueden predecir fallas en el sistema a su vez realizar un mantenimiento programado. Las empresas encargadas del abastecimiento de agua potable en general adoptan en mayor o menor grado, programas de mantenimiento de proactivo y reactivo, dependiendo del nivel de complejidad del sistema. No obstante, la adopción de uno u otro programa es, sin duda, una muestra del grado de evolución gerencial que alcanza una empresa de acueducto.

* Adoptado en el año 2000 por el entonces Ministerio de Desarrollo Económico y actualmente responsabilidad del Ministerio de Vivienda - Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

⁴ NEIWPC. 2003. Optimization Operation, Maintenance, and Rehabilitation of sanitary sewer collection systems, New England Interstate Water Pollution Control Commission, Massachusetts.

Por las razones expuestas anteriormente, se considera la necesidad de crear un modelo para la gestión para el mantenimiento y renovación de tuberías en redes de distribución de agua potable.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer un modelo de gestión para priorizar el mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Clasificar los distritos hidráulicos según los eventos de mantenimiento generados en un intervalo de tiempo a partir de un análisis de puntos calientes.
- Determinar la probabilidad de daño de una tubería mediante un análisis estadístico bayesiano, relacionando la probabilidad de falla de una tubería a las características observadas en la misma (diámetro, material, longitud, edad, etc)
- Estimar la prioridad de mantenimiento de tuberías con base en una función objetivo basada en dos medidas sustitutivas de confiabilidad, el índice de resiliencia (IR) y el coeficiente de uniformidad (CU).
- Implementar el modelo de gestión para priorizar el mantenimiento de redes de distribución de agua potable en un distrito hidráulico del área de influencia del amb S.A. ESP.

3. JUSTIFICACIÓN

En cuanto un esfuerzo considerable ha sido empleado durante las últimas décadas en el desarrollo de proyectos eficientes, la problemática del mantenimiento y rehabilitación de redes de distribución de agua potable ha recibido menor atención. Se podría decir que en la mayoría de las empresas prestadoras del servicio de acueducto que existen en los municipios y ciudades colombianas, las políticas de mantenimiento y rehabilitación de la red de distribución, son netamente correctivas. Esto quiere decir que las actividades de mantenimiento de tuberías se realizan de manera no programada y en caliente, y por lo tanto no muy organizadas.

Lo anterior puede ser justificable para aquellas empresas que operan sistemas de acueducto de baja o media complejidad con un bajo grado de evolución gerencial, pero no para aquellas de complejidad media alta o alta, que obligadas por la normatividad, hacen uso intensivo de sistemas de información geográficos sofisticados y registros históricos de diversa índole, y sin embargo no han adoptado aún políticas de mantenimiento y/o rehabilitación predictiva o preventiva.

Desde la perspectiva de los costos, la red de distribución representa el componente de mayor costo de los sistemas de acueducto. Por otro lado se ha demostrado que aun incluyendo los costos de planeación y/o consultoría en el mantenimiento y/o rehabilitación proactivos, el costo del mantenimiento correctivo sigue siendo mayor que el proactivo.

Esta situación implica por lo tanto la búsqueda de metodologías no reactivas de mantenimiento y renovación de la red de distribución, para las empresas que operan sistemas de acueducto de complejidad media alta o alta. Adicionalmente es altamente deseable que cualquier metodología de mantenimiento y renovación, en lo posible incluya, tanto modelos estadísticos como modelos de análisis técnico de la red (ver Figura 1) buscando metodologías mucho más integrales.

Se plantea una metodología para el mantenimiento y renovación de tuberías de manera proactiva y eficiente a partir de información geográfica y registro de daños de las redes de distribución; mediante la implementación y alineación de tres modelos de mejoramiento: dos modelos estadísticos y un modelo de análisis técnico del sistema.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 GEOESTADÍSTICA Y ESTADÍSTICA ESPACIAL: CONCEPTOS CLAVE

El término Geoestadística fue acuñado en los años 60 por Matheron*, quien formalizó y generalizó matemáticamente un conjunto de técnicas desarrolladas por Krige** (1941) que explotaban la correlación espacial para hacer predicciones en la evaluación de reservas de las minas de oro en Sudáfrica.

4.1.1 Definición de Geoestadística. Giraldo, R. (2002) define la estadística espacial como “un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región”⁵. La Geoestadística permite la estimación, predicción y simulación de fenómenos espaciales (Myers, 1987)⁶ y descubrir la continuidad espacial (Isaaks & Srivastava, 1989)⁷ que en muchos casos es una característica común de muchos fenómenos naturales.

4.1.2 Estadística Espacial. Giraldo, R. (2002) define la “estadística espacial como la reunión de un conjunto de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región”⁵.

4.1.2 Autocorrelación o dependencia espacial. De manera simple, se puede decir que la autocorrelación espacial es la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa. Esto es, si valores relativamente altos (bajos) de la magnitud elegida en una determinada localización vienen acompañados de valores relativamente altos (bajos) de la misma magnitud en las localizaciones vecinas, puede hablarse de la existencia de autocorrelación positiva. Si, por el contrario, valores relativamente altos (bajos) van alternándose geográficamente con valores relativamente bajos (altos) de la misma magnitud en localizaciones adyacentes, la autocorrelación será negativa. Y finalmente puede hablarse de

* Georges François Paul Marie MATHERON (1930 - 2000), fue un matemático y geólogo Francés conocido por ser el fundador de la Geoestadística como se conoce actualmente.

** Daniel Gerhardus KRIGE (1919 – 2013), fue un ingeniero de minas pionero en el campo de la Geoestadística.

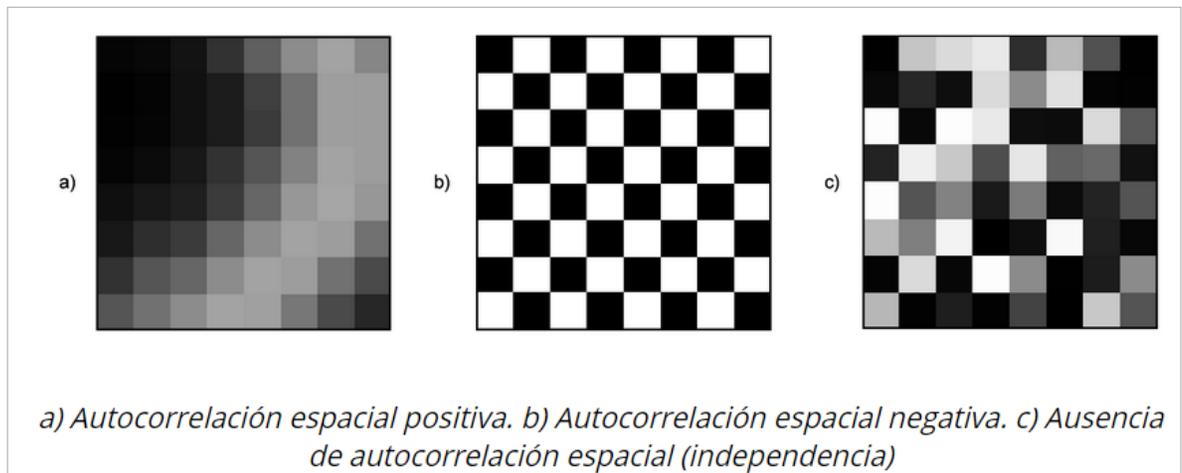
⁵ GIRALDO H., Ramón. Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicación. Bogotá: Departamento de estadística. Universidad Nacional de Colombia, 2002, p. 8

⁶ WARRICK, A. W.; MYERS, D. E. Optimization of sampling locations for variogram calculations. Water Resources Research, 1987, vol. 23, no 3, p. 496-500.

⁷ ISAACS, Edward H.; SRIVASTAVA, R. Mohan. An introduction to applied geostatistics. 1989.

ausencia de autocorrelación espacial, cuando bien no hay autocorrelación positiva o negativa, esto es, cuando la magnitud medida se distribuye de forma aleatoria. Lo anterior puede verse en la Figura 2.

Figura 2. Tipos de Autocorrelación espacial



Fuente: Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica, p. 246. Disponible libre formato Pdf en: <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html> [Consulta 12/07/2015]

De manera más formal, según Getis⁸ de las varias definiciones de autocorrelación espacial existentes en la literatura, la de Hubert, Golledge, y Costanzo (1981) es quizá la más concisa: “Dado un conjunto S que contiene n unidades geográficas, la autocorrelación espacial hace referencia a la relación entre alguna variable observada en las n localidades y una medida de proximidad geográfica definida para todas la n(n-1) parejas elegidas de S”⁹.

4.1.3 Detección y medición de la Autocorrelación espacial. Para detectar la existencia o no de autocorrelación espacial, se procede en general, a probar si se cumple la hipótesis de que la variable medida se encuentra distribuida de forma aleatoria en el espacio (hipótesis nula) o si por el contrario, existe una asociación significativa de valores similares o disímiles entre regiones vecinas.

⁸ GETIS, A. (2008). A history of the concept of spatial autocorrelation: A geographer's perspective. *Geographical Analysis*, 40(3), p. 298.

⁹ HUBERT, Lawrence James; GOLLEDGE, Reg G.; COSTANZO, Carmen M. Generalized procedures for evaluating spatial autocorrelation. *Geographical Analysis*, 1981, vol. 13, no 3, p. 224.

Al respecto se han propuesto diversas medidas (estadísticos) que miden la asociación espacial. De las varias medidas, el estadístico I de Moran (1948) es el más antiguo y ampliamente usado. Algunos de los otros incluyen: El estadístico C de Geary (1954), el G de Getis y Ord (1992), la función K de Ripley (1991), los estadísticos locales I_i de Moran (1995), G_i y G_i^* de Getis y Ord (1995) y I_i de Anselin (1995).

Todos los estadísticos (indicadores) de la asociación espacial poseen en común la matriz de producto cruzado:

$$\sum_i \sum_j W_{ij} C_{ij}$$

Donde W_{ij} recibe el nombre de matriz de conexión, de contigüidad o de peso espacial. Sus valores representan una forma de medición de la contigüidad en los datos originales. La matriz C_{ij} , por su parte, es una medida de la proximidad de los valores i, j , en otra dimensión (por ejemplo, distancia euclídea, distancia esférica, distancia de Manhattan, etc.).

4.1.4 Matriz de contigüidad o pesos espaciales. La detección o contraste de la autocorrelación espacial depende de la interdependencia de las unidades geográficas contiguas entre sí¹⁰. La matriz de pesos espaciales W viene dada como:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ w_{N1} & w_{N2} & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Esta matriz es simétrica y no aleatoria, donde cada elemento w_{ij} , llamado peso, es un número positivo y finito que refleja la intensidad de la interdependencia espacial existente entre las regiones i y j . Sin embargo no hay una definición única de estos pesos. Según Castillo (2010) para estos pesos “la forma más usual es la contigüidad física de primer orden, utilizado por Moran (1948) y Geary (1954), donde w_{ij} es igual a 1 si las regiones i y j son físicamente adyacentes y 0 en caso contrario”¹¹. Dado que cada peso está basado en la contigüidad o vecindad física,

¹⁰ CASTILLO, Diana Jeanneth del Pilar Rodríguez. Modelar la Concentración de la Tierra en Colombia Mediante Modelos Económicos Espaciales. 2010. p. 22.

¹¹ *Ibíd.*, p. 22

esta matriz deja de lado algunas relaciones de interdependencia no físicas como por ejemplo las de tipo comercial entre regiones no vecinas.

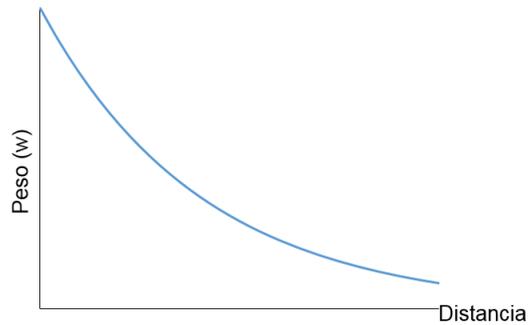
Como se dijo anteriormente no hay una única definición para los pesos que conforman la matriz y por lo tanto existen varios tipos posibles para la matriz de contigüidad, en función de la naturaleza de problema. Así, la determinación de las relaciones de interdependencia espacial dependerá, entre otros, de lo que se quiera medir y del tipo de región analizada (punto o área). Por ejemplo, si se necesita medir la agrupación de cierta especie de planta, se puede utilizar el concepto de distancia inversa en donde el peso de la interdependencia espacial entre cada par de regiones es inversamente proporcional a la distancia euclidiana entre las mismas.

4.1.5 Relaciones de interdependencia espacial. Cada uno de los pesos w_{ij} de la matriz de contigüidad, queda definido por la relación de interdependencia espacial elegida, la cual a su vez como ya se dijo, es función de la naturaleza del problema. A continuación se presentan algunos de ejemplos de relaciones de interdependencia espacial frecuentemente utilizados.

- **Distancia inversa, distancia inversa cuadrada (Impedancia).** Mitchell (2005)¹² define la distancia inversa como un modelo de relación de interdependencia espacial de impedancia o de disminución de la distancia. Esto es, todas las entidades espaciales influyen a las otras, pero entre más lejos esté una de la otra, menor impacto tendrá. En el caso de la distancia inversa se pueden usar dos tipos de distancias. La distancia euclidiana inversa y la distancia Manhattan inversa. La primera suele modelar datos continuos, como variaciones de temperatura. La segunda cuando las entidades espaciales no son continuas, como tiendas o localizaciones urbanas fijas (Estaciones de policía, bomberos, puestos de salud, etc). Con este tipo de relación y con grandes cantidades de datos, el número de cálculos será enorme.

¹² MITCHELL, Andy. The ESRI guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. Redlands. 2005. p.12.

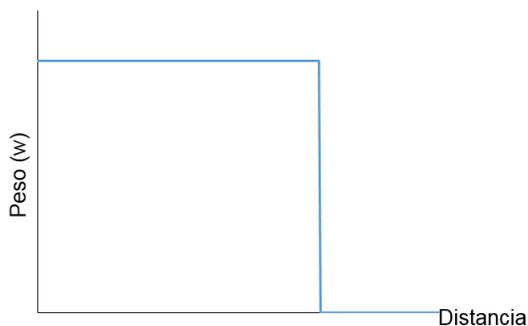
Figura 3. Relación de distancia Inversa



Fuente: El Autor.

- **Banda de distancia (esfera de influencia).** Mitchell (2005)¹³ expresa la banda de distancia como una esfera de influencia que analiza las entidades vecinas localizadas dentro de una distancia umbral y que interactúan espacialmente entre sí. Los vecinos dentro de la distancia umbral se ponderan por igual. Los valores por fuera de la distancia de banda no se ponderan y su peso en la interacción es cero. Esta distancia fija es apropiada cuando se necesitan evaluar estadísticas de los datos en una escala espacial en particular.

Figura 4. Relación de Banda de distancia

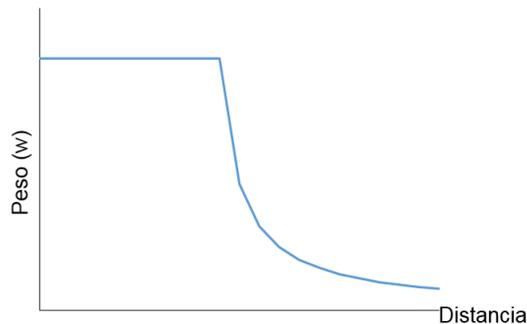


Fuente: El Autor.

¹³ MITCHELL, Andy. The ESRI guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. Redlands. 2005. p.12.

- **Zona de indiferencia.** Mitchell (2005)¹⁴ define la zona de indiferencia como una combinación de los modelos de distancia inversa y distancia de banda fija. Las entidades dentro de la distancia umbral se incluyen en los análisis para la entidad destino y se ponderan por igual. Al exceder la distancia crítica, la relación de interdependencia pasa a ser del tipo de distancia inversa. Se usa usualmente cuando se quiere mantener la escala de análisis fija y no se desea colocar límites en las entidades vecinas.

Figura 5. Relación de Zona de indiferencia

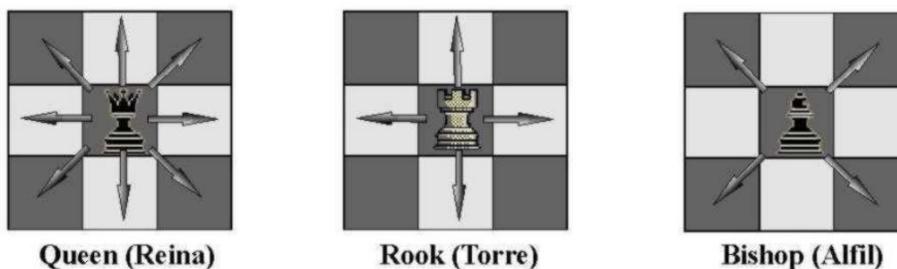


Fuente: El Autor.

- **Polígonos adyacentes.** Básicamente un polígono puede estar conectado con otro por los bordes, por los vértices o tanto por bordes como por vértices. De este modo se pueden definir tres criterios de contigüidad física o vecindad. En el criterio reina, serán vecinas de i las regiones que comparten algún borde o vértice con i y éstas se incluirán en el cálculo de entidad destino i , mientras los demás no se incluyen. De manera análoga, en el criterio torre, serán vecinas de i las regiones que comparten algún borde con i , y en el criterio alfil, serán vecinas de i las regiones que comparten algún vértice.

Figura 6. Tipos de Contigüidad entre polígonos

¹⁴ Ibíd., p.12



Fuente: CELEMÍN, Juan Pablo. Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial: Importancia, estructura y aplicación. Revista Universitaria de Geografía, 2009, vol. 18, no 1, p.14.

4.2 ANÁLISIS DE PUNTOS CALIENTES (HOT SPOTS Ó GETIS-ORD)

El estadístico G_i^* de Getis y Ord (1995), conocido también como análisis de puntos calientes, es una medida que sirve para detectar la existencia o no de autocorrelación espacial local. Esta medida es una adaptación del estadístico general G de Getis y Ord (1992), un método global para cuantificar el grado de autocorrelación espacial sobre un área. El estadístico general G calcula un solo valor para el área entera de estudio, mientras que G_i^* mide cómo varía la autocorrelación localmente sobre el área de estudio y calcula un valor para cada entidad geográfica (punto o área).

G_i^* es frecuentemente usado en análisis del crimen, concentración de las lluvias, epidemias, accidentes, intención de voto, entre otros. Para el caso que atañe el presente trabajo, no se encontró en la revisión de la literatura, algún caso de aplicación de este análisis a la distribución de daños en las tuberías de redes de distribución de agua.

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d) x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (2)$$

Donde $G_i^*(d)$ es el estadístico local G para una entidad i dentro de una distancia d , x_j es el valor del atributo de cada vecino, y w_{ij} es cada uno de los elementos de la matriz de contigüidad espacial W . Típicamente la distancia entre unidades geográficas es calculada como la distancia euclidiana.

Comúnmente el estadístico G_i^* usa la relación de interdependencia espacial de distancia de banda para el cálculo de los pesos w_{ij} . Así, el parámetro límite o umbral d , define la distancia dentro de la cual las regiones son consideradas como vecinos y se asigna un valor de 1 para el peso, y las regiones por fuera no son

consideradas vecinas y se asigna un valor de cero para el peso. La definición de la distancia umbral depende de la naturaleza de las unidades geográficas (puntos o áreas) y de la naturaleza del problema o fenómeno analizado, y debería ser definida de acuerdo con la distancia en que se presentan picos de autocorrelación espacial. Esto es, mediante un proceso iterativo que examine cómo lo autocorrelación espacial varía con la elección de diferentes distancias. El estadístico G_i^* es sólo aplicable para valores positivos de x .

Con el fin de mejorar el test estadístico, Getis y Ord (1995)¹⁵ desarrollaron una forma transformada de G_i^* tomando el estadístico G_i^* menos su esperanza, dividido entre la raíz cuadrada de su varianza. Esta transformación, denominada G_i^* estandarizado es dada finalmente en la ecuación (3).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}(d)}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)\right)^2}{n-1}}} \quad (3)$$

Donde n es el número total de observaciones.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

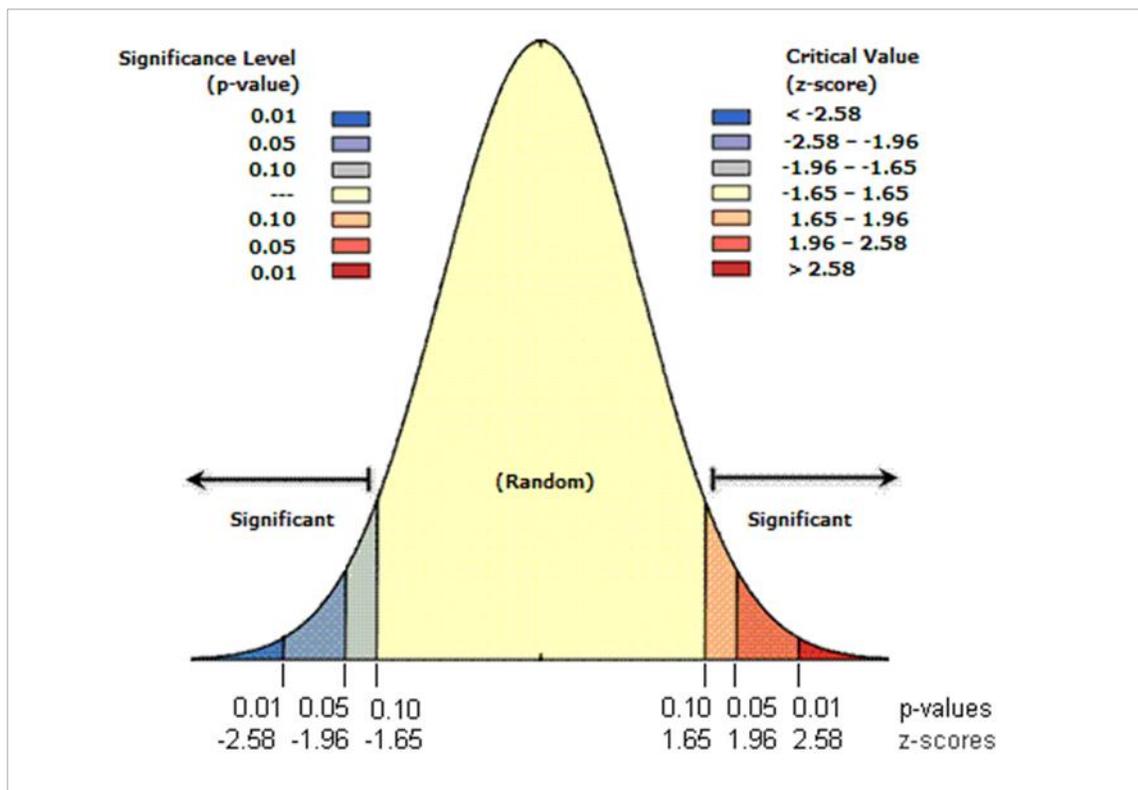
4.2.1 Prueba de autocorrelación espacial local con G_i^* . Para detectar el grado de autocorrelación local entre cada entidad geográfica y sus vecinos, se debe probar si se cumple la hipótesis nula de que la variable se encuentra distribuida de forma aleatoria en el espacio o si por el contrario, existe una asociación significativa de valores similares o disímiles entre regiones vecinas. Esto se ejecuta mediante un test de puntaje $Z(G_i^*)$ ($Z(G_i^*)$ es la variable estandarizada del G_i^*), sabiendo que para tamaños muestrales suficientemente grandes, la

¹⁵ ORD, J. Keith; GETIS, Arthur. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. Geographical analysis, 1995, vol. 27, no 4, p. 286-306.

distribución del estadístico G_i^* después de su estandarización ($Z(G_i^*)$) sigue a nivel asintótico, una distribución normal estándar según Cliff y Ord (1981)¹⁶.

Así, un valor significativo positivo (negativo) de $Z(G_i^*)$, indica la existencia de una tendencia a la concentración de valores altos (bajos) y por tanto llevará a rechazar la hipótesis nula de no autocorrelación espacial. Mientras que valores no significativos positivos (o negativos) indican una distribución aleatoria y por tanto llevaran a aceptar la hipótesis nula. De existir autocorrelación espacial, los clusters de valores altos son llamados puntos calientes (*Hot-spots*) y los de valores bajos son llamados puntos fríos (*Cold-spots*). Lo anterior puede visualizarse en la Figura 7.

Figura 7. Test del puntaje $Z(G_i^*)$



Fuente: MITCHELL, Andy. The ESRI guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. Redlands. 2005, p.24.

Para el cómputo de este test, y en general para cualquier otro (I de Moran o C de Geary), se puede usar cualquier definición de la matriz de contigüidad W . Sin

¹⁶ CLIFF, Andrew David; ORD, J. Keith. Spatial processes: models & applications. London: Pion, 1981.

embargo los resultados obtenidos por los diferentes contrastes pueden variar, a veces drásticamente, en función de la matriz W especificada.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO BAYESIANO

La teoría de conjuntos sirvió de base para el planteamiento de los axiomas para la teoría de probabilidades. El teorema de Bayes* está basado en la propiedad conmutativa de la intersección de conjuntos. Su importante relevancia radica en que vincula la probabilidad de A dado B con la probabilidad de B dado A . Es decir por ejemplo, que sabiendo la probabilidad de que una tubería tenga un material, dado que ha presentado daño; se podría saber (si se tiene algún otro dato) la probabilidad de fallo de la tubería, dado que presenta determinado material.

En el contexto de los daños en redes de distribución de agua, puede construirse un modelo de predicción basado en el mismo principio, el cual asigna una probabilidad de daño a una tubería, dado que la tubería tiene una probabilidad conocida de presentar ciertas características específicas (material, diámetro, edad, zona, longitud, etc)

4.3.1 Conceptos en Estadística Bayesiana.

- **Eventos mutuamente excluyentes o disjuntos.** Dos o más eventos son mutuamente excluyentes o disjuntos, si no pueden ocurrir simultáneamente. Es decir, la ocurrencia de un evento impide automáticamente la ocurrencia del otro evento (o eventos). De este modo se dice que A y B son mutuamente excluyentes si y sólo si $A \cap B = \emptyset$

Por ejemplo al lanzar un dado, considérese los eventos A : Sacar un número par y B : Sacar un número impar. Tales eventos son mutuamente excluyentes.

- **Eventos Independientes.** Dos o más eventos son independientes, cuando la ocurrencia o resultado de un evento no tiene efecto sobre (y no es afectado por) la ocurrencia o resultado de otro(s) evento(s).

Por ejemplo al lanzar un dado, el resultado no depende de ninguno de los lanzamientos anteriores. Por lo tanto cada lanzamiento es un evento independiente.

- **Axiomas de Probabilidad.** Denotando $P(X)$ como la probabilidad de ocurrencia del evento X :

* Thomas Bayes (1702-1761)

1. $0 \leq P(X) \leq 1$ Para cualquier evento X
2. Si A y B son eventos disyuntos, entonces $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$
3. $P(S) = 1$ donde S es el espacio muestral.

- **Teoremas de Probabilidad.**

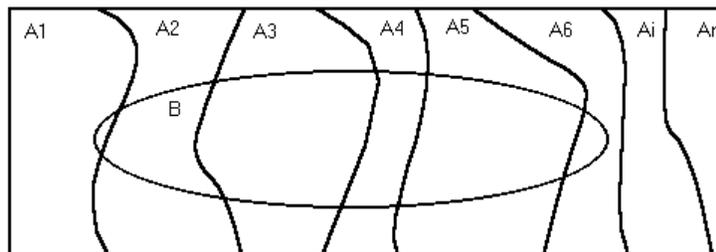
1. $P(\emptyset) = 0$
2. $P(X) + P(X^c) = 1$
 Corolario: $P(A \cup B) + P(A^c \cap B^c)$
3. Sean A y B eventos cualesquiera, entonces $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$
 Corolario: $P(A_1 \cup A_2 \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) \dots + P(A_n) - P(A_1 \cap A_2) - P(A_1 \cap A_3) \dots - P(A_1 \cap A_n) - P(A_2 \cap A_3) - P(A_2 \cap A_4) \dots - P(A_2 \cap A_n) \dots - P(A_{n-1} \cap A_n) + P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) + \dots + P(A_{n-2} \cap A_{n-1} \cap A_n) - P(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4) - \dots - P(A_{n-3} \cap A_{n-2} \cap A_{n-1} \cap A_n) \dots$
4. A y B son eventos independientes, si y sólo si $P(A \cap B) = P(A)P(B)$

- **Probabilidad condicional.** Dados A y B eventos cualesquiera:
 $P(A|B) = P(A \cap B)/P(B)$. Donde $P(A|B)$ es la probabilidad de que ocurra A dado que ha ocurrido B

- **Teorema de Probabilidad Total.** Sean A_1, A_2, \dots, A_n eventos mutuamente excluyentes y exhaustivos (conforman una partición del espacio muestral) y B un evento cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales $P(B|A_i)$, entonces:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A_i) P(A_i)$$

Figura 8. Diagrama de Venn Eventos en la Ley de Probabilidad Total



Fuente: <http://www.uv.es/ceaces/base/probabilidad/total.htm> [Consulta 13/07/2015]

- **Teorema de Bayes.** Sean A_1, A_2, \dots, A_n eventos mutuamente excluyentes y exhaustivos (conforman una partición del espacio muestral) y B un evento cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales $P(B|A_i)$, entonces:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} \quad (4)$$

4.3.2 Formulación del análisis.

- **Antecedente.** Kleiner & Rajani. (2001)¹⁷ argumentan que la premisa básica del modelo estadístico Bayesiano de la probabilidad de falla en una tubería puede ser relacionada por tres factores:

1. La probabilidad de falla del sistema P_F
2. La probabilidad de observar características específicas c sobre una tubería que presenta un daño $P(c|f)$
3. La probabilidad de observar las mismas características c sobre una tubería que no ha fallado $P(c|nf)$

Estos tres factores se pueden relacionar mediante el Teorema de Bayes como se presenta en la Ecuación (6).

$$\text{Prob}(fallar | \text{caracter. especif.}) = \frac{P(c|f) P_F}{P(c|f) P_F + P(c|nf) (1 - P_F)} \quad (5)$$

- **Estados de Condición.** Para el problema a abordar, no se considera una sola partición del espacio muestral, esto es, no existe una única partición A_1, A_2, \dots, A_n , sino más bien 4 particiones del espacio muestral a saber: La primera dividirá las tuberías en rangos de edad (E_1, E_2, E_3, E_4), la segunda en tipos de material (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5), la tercera en rangos de diámetro (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5) y la última en rangos de longitud (L_1, L_2, L_3, L_4).

De este modo, un estado de condición puede definirse como la combinación de características individuales, esto es, está definido por una combinación

¹⁷ KLEINER, Yehuda; RAJANI, Balvant. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. Urban water, 2001, vol. 3, no 3, p. 131-150.

de características (E_i, M_j, D_k, L_m). Por ejemplo, un estado de condición de una tubería puede corresponder a la siguiente combinación de características: 50 años de edad, Material Hierro Fundido, 6" de diámetro y 25 m de longitud.

- **Capacidad Diagnóstica en el Sistema.** Si una característica es frecuentemente observada sobre las tuberías que han registrado historia de falla, esto no es suficiente razón para incrementar la probabilidad de falla en una tubería con esas características (Fenner et al, 1999). Si la Probabilidad [Falla | característica específica] es cercana en valor a la probabilidad de falla, entonces esta característica tiene baja capacidad diagnóstica. Si el valor es significativamente grande o pequeño que P_F , entonces la presencia de esta característica puede explicar una relativamente alta (o baja) tasa de falla. (Kulkarni, 1986).

Fenner et al. (1999) propone una fórmula para calcular la capacidad diagnóstica o de frecuencia de falla en el sistema $D(x)$, para aquellas tuberías cuyas características han tenido una frecuencia de falla más grande que la promedio a lo largo del sistema. $D(x)$ puede ser calculada como se muestra en la Ecuación 6.

$$D(x) = \frac{\text{Prob}(fallar | caracter. específ.) - P_F}{P_F} \quad (6)$$

Entre mayor sea esta relación, mayor es la importancia de una característica específica para explicar la existencia de falla

- **Problema.** Se conocen indirectamente, a través del registro histórico de eventos en determinado año, para el sector de estudio:
 - a. Las probabilidades de observar características específicas E_i, M_j, D_k, L_m : edad, material, diámetro y longitud, para cualquier i, j, k ó m ; en tuberías que han presentado fallo. Esto es, se conocen las probabilidades $P(E_i | F)$, $P(M_j | F)$, $P(D_k | F)$ y $P(L_m | F)$, donde el evento F es presentar fallo.

Se conocen indirectamente, a través del catastro de redes en determinado año, para el sector de estudio:

- b. Las probabilidades a priori de observar características específicas E_i, M_j, D_k, L_m . Esto es, se conocen las probabilidades $P(E_i)$, $P(M_j)$, $P(D_k)$ y $P(L_m)$
- c. La probabilidad de fallo del sistema $P(F)$

El problema a es entonces el siguiente: dada una tubería con un estado de condición $C_x = E_i \cap M_j \cap D_k \cap L_m$ se desea hallar su probabilidad de fallo, esto es: $P(F | C_x)$

Del teorema de Bayes de tiene que:

$$P(C_x|F) = \frac{P(F|C_x)P(C_x)}{P(F)}$$

Luego:

$$P(F|C_x) = \frac{P(C_x|F)P(F)}{P(C_x)}$$

Ahora:

$$P(C_x|F) = P(E_i \cap M_j \cap D_k \cap L_m | F)$$

Bajo la hipótesis de que los eventos E_i , M_j , D_k , L_m son independientes, se puede verificar mediante la probabilidad condicional que:

$$P(E_i \cap M_j \cap D_k \cap L_m | F) = P(E_i | F) P(M_j | F) P(D_k | F) P(L_m | F) \quad (7)$$

De este modo se deduce que:

$$P(F | E_i \cap M_j \cap D_k \cap L_m) = \frac{P(E_i | F) P(M_j | F) P(D_k | F) P(L_m | F) * P(F)}{P(E_i) P(M_j) P(D_k) P(L_m)} \quad (8)$$

Las tuberías con una mayor probabilidad de falla deberán tener prioridad de mantenimiento sobre las otras. Por tal motivo, se pueden clasificar las tuberías, de la de mayor prioridad hasta la que tiene menor prioridad de mantenimiento.

4.4 CONFIABILIDAD HIDRÁULICA

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS* incluye el concepto de *Confiabilidad de la red de distribución* en concordancia con la fuerte tendencia actual de considerar o incorporar el concepto en los proyectos de diseño, evaluación y renovación. La introducción del concepto de confiabilidad y su cuantificación vienen dados por la necesidad de medir y proveer un nivel adecuado de servicio.

* Ministerio de Vivienda - Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

El reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, en su título B (Sistemas de Acueducto), Capítulo 7 (Redes de distribución), subcapítulo 7.3; establece las condiciones técnicas generales con las que deben contar las redes de distribución. Al respecto incorpora en su numeral 7.3.11 el concepto de Confiabilidad de la red de distribución y menciona:

Con el fin de aumentar la confiabilidad en la distribución del servicio de acueducto, para los niveles de complejidad del sistema medio alto y alto debe incorporarse en el diseño de redes nuevas de distribución o ampliación a redes existentes el concepto de resiliencia de la red. En general se deben preferir aquellos diseños, que dentro de los que presenten niveles de evaluación socioeconómicas apropiados, sean los que representen redes con resiliencias superiores al 50%. De esta manera, se logran tener redes con respuestas más apropiadas ante eventos de falla de algunas de sus tuberías¹⁸.

4.4.1 Definición Tentativa. Dada la generalidad y complejidad del concepto, actualmente en la literatura no existe una definición universal y acabada de confiabilidad hidráulica de las redes de distribución, de hecho el RAS no presenta una definición estricta de tal concepto, sino una forma de contribuir a su aumento. En un intento por presentar una definición que reúna diversas interpretaciones que se han dado al concepto, bien se podría decir que es: *La fortaleza de una red para mantener un nivel de servicio adecuado (en términos de disponibilidad de caudal y presión) frente a eventos adversos, como aumentos de la demanda, rotura o cierre de tuberías, paradas en las bombas, falla de válvulas, fugas en la red, aumento de la rugosidad de las tuberías, entre otros.*

4.4.2 Indicadores de confiabilidad. Asociado al hecho de que la confiabilidad hidráulica es un concepto muy general que contempla muchas variables, no existe universalmente una única medida y tampoco se ha establecido un único nivel de confiabilidad que deben alcanzar las redes de distribución. Pero obviamente esto es entendible, si no, habría que imaginar el alto grado de complejidad matemática y algorítmica de una hipotética formulación que tuviese en cuenta todas las variables.

No obstante, históricamente la confiabilidad hidráulica y sus indicadores o medidas, ha venido asociándose fuertemente a dos aspectos que deben coexistir: redundancia de rutas de la red y suficiencia de energía (redundancia energética), de manera que la redundancia de rutas provee caminos alternativos para el fluido y la suficiencia de energía provee la entrega del servicio a una presión adecuada. A continuación se muestran ejemplos de diversas medidas que se han venido considerando en torno a la confiabilidad de las redes de distribución de agua.

¹⁸ Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Numeral 7.3.11.

Alperovits & Shamir, (1977)¹⁹ estuvieron de acuerdo en que la confiabilidad de las redes de distribución está relacionada con la redundancia de rutas por las que el fluido pueda llegar a los nodos de consumo y que esto implicaba mantener una configuración mallada de las redes.

Tung, (1985)²⁰ define la confiabilidad de los sistemas de distribución de agua como la probabilidad de que el flujo alcance a los puntos de demanda en la red.

Ormsbee & Kessler (1990)²¹ definen la redundancia como medida de la confiabilidad y a su vez definen dos tipos de redundancia, topológica e hidráulica. La redundancia topológica asegura la existencia de más de un camino de la fuente al nudo de consumo. La redundancia hidráulica asegura la capacidad de transportar el fluido por un camino redundante alterno, abasteciendo una presión adecuada a los nudos para condiciones de cargas específicas.

Xu & Goulter (1999)²² acuerdan que la confiabilidad de la red es medida por su capacidad de asegurar la demanda de los nudos a una presión mínima requerida.

Para Walski y Gessler (1999)²³, la confiabilidad de la red depende de la sobrepresión disponible para los nudos de consumo.

4.4.3 Resiliencia como indicador de confiabilidad. De las múltiples medidas o indicadores de confiabilidad existentes en la literatura actual, el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS ha adoptado el índice de resiliencia de Todini (2000)²⁴ y ha establecido un valor mínimo para el mismo.

¹⁹ ALPEROVITS, E & SHAMIR, U. Design of Optimal Water Distribution Systems. En: Water Resources Research. Vol.13, No 6 (Diciembre, 1977); p 888.

²⁰ TUNG, Y.K. (1985). Evaluation of Water distribution network reliability. Proc., ASCE Hydraulics Specialty Conf., ASCE, New York, p. 361.

²¹ ORMSBEE, L.E; KESSLER, A., (1990). Optimal Upgrading of Hydraulic Network Reliability, ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 116 (6), p. 786.

²² XU, C., GOULTER, I.C., 1999. Reliability Based Optimal Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 125, p.355.

²³ WALSKI, T.M., and GESSLER, J. (1999). "Discussion on "Improved design of 'Anytown' distribution network using structured messy genetic algorithms by G.A. Walters, D. Halhal, D.A. Savic, and D. Ouzar." Urban Water, 12, 266

²⁴ TODINI, Ezio. Looped water distribution networks design usign a resilience index based heuristic approach. En: Urban Water. Vol.2, Issue 2 (Junio, 2000); p 115-122.

El índice de resiliencia de Todini (I_R) es una medida que indica el grado de eficiencia energética de la red. Está basado en la noción de que las pérdidas de energía interna incrementarán cuando la demanda incrementa o cuando se inhabiliten tuberías, por lo tanto es deseable que exista un superávit suficiente de energía (redundancia energética) para ser disipada internamente en caso de inhabilitación de tuberías o incrementos de la demanda. De este modo una red con bajas pérdidas internas (red eficiente) es una red que “ahorra” energía y que tal “ahorro” constituye el superávit de energía mencionado.

- **Índice de resiliencia de Todini.**

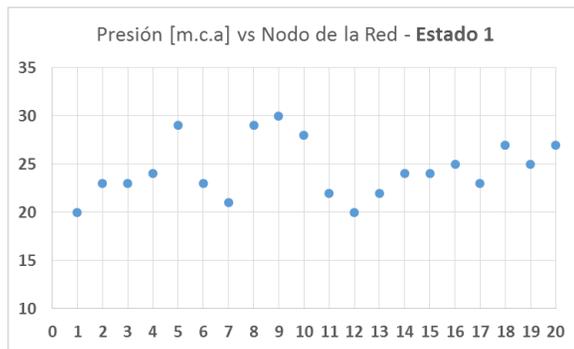
$$I_R = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} (Q_j + Q_{f,j})(H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{k=1}^{n_{pu}} \frac{P_k}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_n} (Q_j + Q_{f,j}) H_j^*} \quad (9)$$

Donde: Q_e y H_e son el caudal y la altura piezométrica suministrada por el embalse i respectivamente, n_e es el número de embalses, γ el peso específico del agua, P_k es la potencia suministrada por la bomba k , n_{pu} es el número de bombas en la red. La potencia que suministra una bomba k en términos de caudal y cabeza piezométrica dada es $P_k = \gamma h_k Q_k$, Q_j es el caudal entregado al nodo j , H_j^* la altura piezométrica mínima permitida para el nodo j , H_j la altura piezométrica real de entrega en el nodo j y $Q_{f,j}$ es el caudal de fuga en el nodo j .

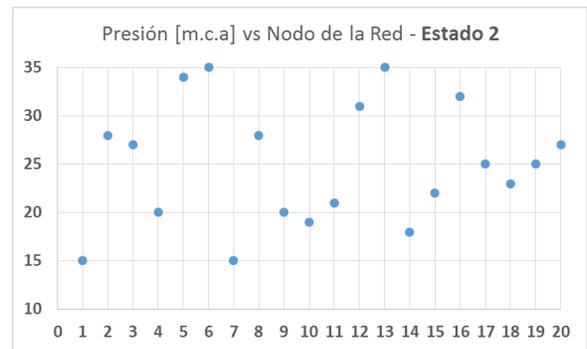
4.4.4 Resiliencia vs costo y presión. Una red con mayor valor del índice de resiliencia, es una red que, en general, entrega el servicio con algún superávit de presión (mayores presiones) lo que a su vez propende por el uso de diámetros mayores (mayores costos). Se presenta entonces un escenario de potencial conflicto resiliencia vs costo y presión, ya que las altas presiones no son deseadas generalmente porque contribuyen a generar daños y fugas.

Debe buscarse entonces un equilibrio entre resiliencia, costo y presión, y propender por aquellas soluciones óptimas que con pocos cambios (bajos costos) conduzcan a grandes incrementos en resiliencia, cuidando del nivel de presiones del sistema.

Supóngase una red de distribución que entrega el servicio en todos los nodos a una presión mayor o igual a la mínima. Considérese dos estados de dicha red:



promedio	24.45
moda	23.00
mediana	24.00
máximo	30.00
mínimo	20.00
rango	10.00
varianza	8.55
desviación estándar	2.92
Coef variación	0.12
coef uniformidad	0.82



promedio	25.00
moda	15.00
mediana	25.00
máximo	35.00
mínimo	15.00
rango	20.00
varianza	37.80
desviación estándar	6.15
Coef variación	0.25
coef uniformidad	0.71

Ambos estados operan al mismo nivel promedio de presiones, no obstante el estado 1 puede más fácilmente, ser objeto de la reducción del nivel general de presiones.

4.5 ANTECEDENTES

4.5.1 Estadísticos G para evaluar la autocorrelación espacial. Getis and Ord introducen una familia de estadísticos G para indagar la autocorrelación espacial (1992)²⁵. Así mismo comparan el estadístico G general (global) con el I de Moran para situaciones similares hipotéticas y empíricas. En el trabajo empírico se incluyen análisis acerca del síndrome de muerte repentina de infantes en el estado de North Carolina y acerca de los precios unitarios de vivienda en el área metropolitana de San Diego. Los resultados indicaron que el estadístico G debería ser usado en conjunto con I con el fin de identificar las características de patrones no revelados por el estadístico I por sí solo y específicamente los estadísticos G_i y G_i^* permitieron detectar clusters de dependencia local que no pudieron ser mostrados usando estadísticos globales.

Desde entonces se han reconocido ciertos casos comunes de aplicación de los estadísticos G de Getis y Ord, como son el análisis del crimen, epidemiología, análisis de patrones de voto, geografía económica, análisis de ventas, análisis de accidentes de tránsito y demografía.

²⁵ GETIS, Arthur; ORD, J. Keith. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical analysis, 1992, vol. 24, no 3, p. 189-206.

4.5.2 Aplicación de Estadísticos G a los daños en tuberías. No se encontró en la revisión de la literatura, algún caso de aplicación del estadístico G_i^* al análisis de la distribución de daños en las tuberías de redes de distribución de agua. Más aún, no se encontró casos de aplicación de test de autocorrelación espacial a la distribución de los daños de tuberías en redes de distribución.

4.5.3 Estadística bayesiana en un análisis de fallo en tuberías de gas. Kulkarni et al. (1986)²⁶ desarrollaron el Cast Iron Maintenance Optimisation System (CIMOS)

en una consultoría realizada para el para el Gas Research Institute of Chicago, la cual consistía en identificar los segmentos de las tuberías de Gas que eran propensas a fallar y determinar el tiempo óptimo para reemplazar estas tuberías, para lo cual se utilizó un método estadístico Bayesiano. Ellos identificaron dos grupos de características de las tuberías: estáticas (Diámetro, longitud, tipo de suelo, etc) y dinámicas (número acumulado de daños, edad, etc).

4.5.4 SIG y estadística Bayesiana en rehabilitación de alcantarillados. Fenner et al (1999)²⁷ presentan una metodología de múltiples componentes para la rehabilitación de alcantarillados basada en factores causales de falla. El primer componente corresponde al análisis de los datos de tuberías contenidas en unas grillas de 500 m x 500 m, las cuales son definidas utilizando un programa de Sistemas de Información Geográfica. La metodología incluye un algoritmo que permite determinar la probabilidad de falla de cada tubería basada en eventos pasados de fallos de éstas, así como en un factor basado en condiciones locales y globales. La metodología además incorpora un modelo simple de costos el cual es aplicado para identificar aquellas grillas en cuales sería más eficiente rehabilitar desde el punto de vista del costo. El segundo componente de la metodología es un modelo estadístico Bayesiano que permite analizar el desempeño de las tuberías individuales en aquellas grillas identificadas como las grillas de mayor riesgo. Las características significativas de las tuberías son agrupadas en una serie de combinaciones (condición de Estado) y se calcula la probabilidad de falla aplicando el teorema de Bayes. Después de calcular la probabilidad de falla de las tuberías, se construye un *ranking* de probabilidad de falla.

²⁶ KULKARNI, R., GOLABI, K., & CHUANG, J. Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast iron gas piping systems, phase I. 1986. (No. GRI 86-0197 TOPICAL RE).

²⁷ FENNER, R. A.; SWEETING, L. A decision support model for the rehabilitation of "non-critical" sewers. Water Science and Technology, 1999, vol. 39, no 9, p. 193-200.

4.5.5 Uso de estadística Bayesiana en renovación de redes de acueductos.

(Watson, 2001)²⁸ establece una metodología rigurosa y robusta para tomar decisiones en la priorización y renovación de tuberías, así como en la predicción de futuros gastos. El objetivo de su investigación fue desarrollar un sistema de decisión basado en el Teorema de Bayes. El modelo de decisión se enfocaba en la gestión de redes a largo plazo.

4.5.6 Diseño y optimización de redes a través del índice de Resiliencia.

Todini (2000)²⁹ afirma que una topología cerrada o en bucle para una red de distribución, aunque es un criterio de confiabilidad; no garantiza por sí misma la entrega del agua a los diferentes nodos bajo condiciones modificadas o de estrés de la red. Al respecto expone que se debería incrementar la resiliencia del sistema para que el sistema reaccionara y superara las condiciones de estrés y desarrolla para tal fin un índice de resiliencia.

Todini (2000)³⁰ desarrolla una técnica heurística simple que trata de emular el razonamiento de un diseñador de redes, quien por un lado busca reducir el costo de la red y por otro lado busca proporcionar un suficiente grado de resiliencia en el sistema. Demuestra que la técnica desarrollada es capaz de describir rápidamente la frontera óptima de Pareto en el espacio Costo-Resiliencia. Afirma que la eficiencia de la técnica prevalece en el caso de redes de distribución complejas para las que se espera un alto tiempo de cómputo cuando se utilizan técnicas de optimización más rigurosas.

Saldarriaga y Araque (2006)³¹ desarrollaron una metodología basada en la técnica heurística propuesta por Todini para optimizar el comportamiento técnico de las redes de distribución mediante el aumento del índice de resiliencia de Todini, cuidando de no elevar los costos y el nivel de presiones a valores no rentables o adecuados.

²⁸ WATSON, Tim, et al. Maintenance of water distribution systems. En Proceedings of the 36th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, University of Canterbury, New Zealand. 2001. p. 57-66.

²⁹ TODINI, Ezio. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. En: Urban Water. Vol.2, Issue 2 (Junio, 2000); p 116.

³⁰ *Ibíd.*, p. 122.

³¹ ARAQUE FUENTES, D. (2006). Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes.

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE TRABAJO

El presente trabajo conforma a una investigación aplicada, consistente en la concepción, desarrollo y aplicación de un modelo de mantenimiento y rehabilitación de redes de distribución de agua potable. El trabajo busca a partir de información geográfica y registros de daños de las redes de distribución, generar mapas de rehabilitación, involucrando para ello análisis de autocorrelación espacial de la distribución de daños mediante el estadístico G_i^* de Getis y Ord, análisis estadístico bayesiano y análisis de confiabilidad hidráulica de la red.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Fase 1. Recolección y Organización de Información.

- **Atributos mínimos por daño.** Es necesario para los análisis de autocorrelación espacial y estadístico Bayesiano, que como mínimo cada daño registrado tenga los siguientes atributos:

Atributos Críticos

1. Coordenadas (x, y) del daño.
2. Tipo de daño o Resultado
3. Fecha del daño

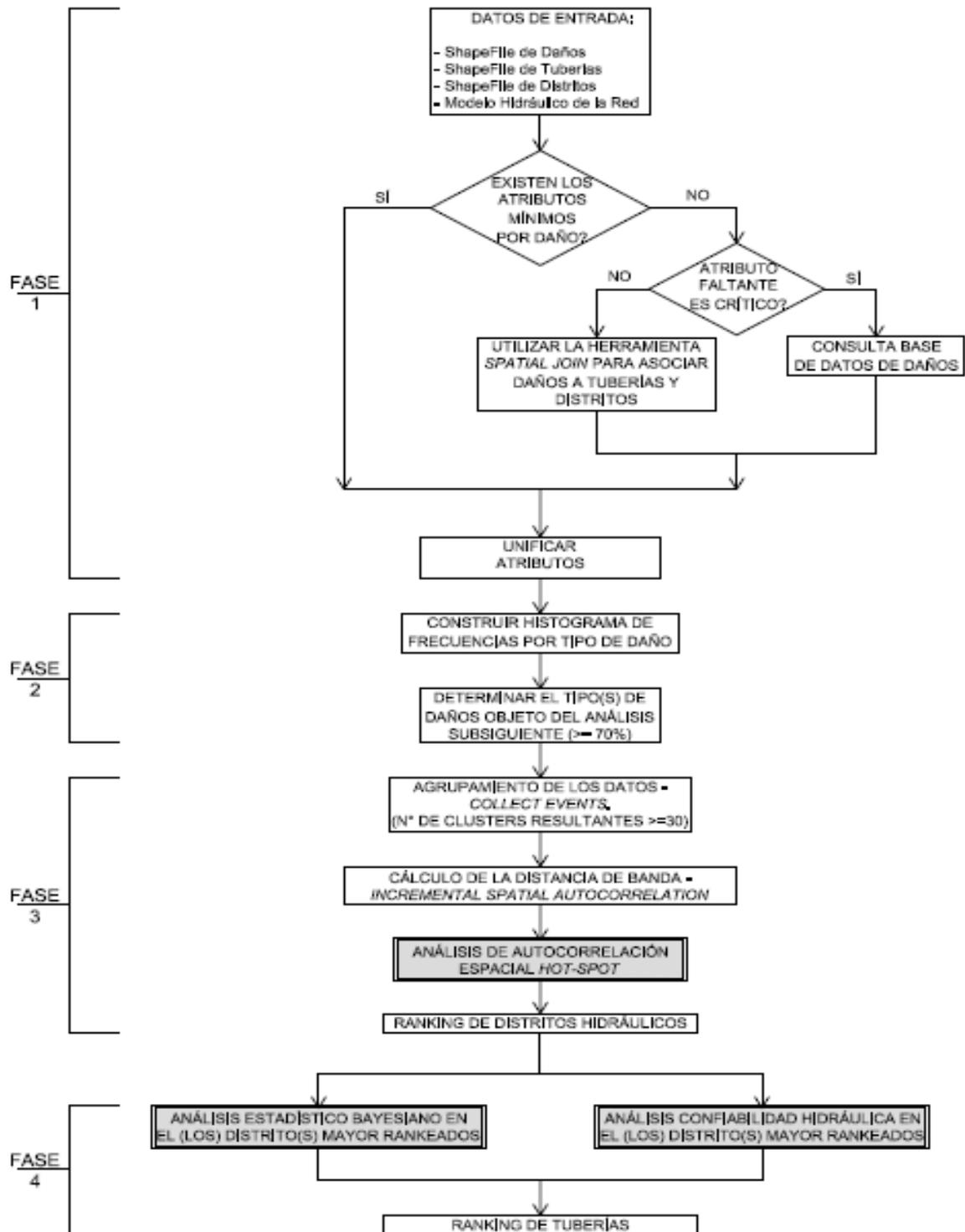
Atributos No Críticos

4. Distrito hidráulico al que pertenece el daño.
5. Tubería asociada al daño
6. Edad de la tubería en el momento del daño
7. Material de la tubería en el momento del daño
8. Diámetro de la tubería en el momento del daño
9. Longitud de la tubería

No obstante, la recomendación es que la ocurrencia de un daño debe ser una oportunidad para extraer y consignar el máximo de atributos.

- **Unificación de Atributos de los daños.** Con el fin de poder realizar una síntesis correcta de todos los datos, es necesario, dado el caso, estandarizar o unificar los campos de atributos de manera que cualquier daño tenga los mismos atributos: en número y tipo de datos de cada atributo. Para los atributos mínimos el tipo de dato debe estandarizarse de acuerdo a la Tabla 1.

Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Fuente: El Autor.

Tabla 1. Tipo de dato de los atributos mínimos

CAMPO	TIPO DE DATO ESTÁNDAR
Coordenadas	Double
Tipo de daño / Resultado	String
Fecha del daño	Date
Distrito del daño	String
ID Tubería asociada al daño	Integer
Edad de la tubería [años]	Double
Material de la tubería	String
Diámetro de la tubería	Double
Longitud de la tubería	Double

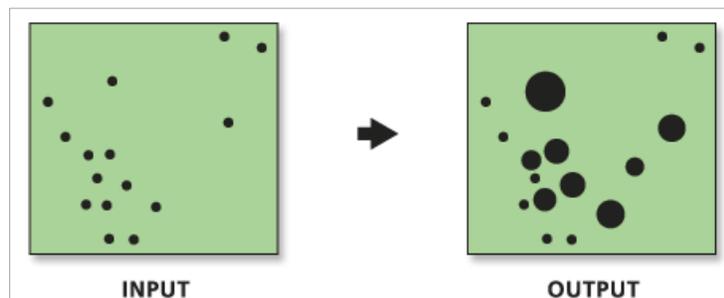
Fuente: El Autor.

5.2.2 Fase 2. Determinación de los tipos de daño significativos. El siguiente paso es construir un histograma de frecuencia de ocurrencia de cada tipo de daño, con el fin de determinar el(los) tipo(s) de daños más significativos que serán finalmente el objeto de estudio. Para esto se debe organizar el histograma en orden descendiente de frecuencias y en seguida se eligen los tipos de daño cuya frecuencia acumulada sea mayor o igual al 70%.

5.2.3 Fase 3. Test de Autocorrelación espacial G_i^* y Ranking de distritos.

- **Agrupamiento (Clustering) de los datos.** Con el fin de preparar los datos para el test de Autocorrelación espacial G_i^* en ArcGIS, se deben agrupar los daños. Para esto se hace uso de las herramientas *Integrate* y *Collect Events* del Software ArcGIS. Mediante estas herramientas se integran los daños dentro de una tolerancia de coordenadas X y Y especificadas. La elección de la tolerancia debe ser en lo posible pequeña y tal que se produzcan al menos 30 grupos (clusters) de daños, dado que el número de entidades geográficas mínimo para la entrada al análisis *Hot-Spot* en ArcGIS es de 30. *Collect Events* crea nuevas entidades geográficas de tipo punto con un atributo correspondiente a la suma de todos los daños agrupados.

Figura 10. Funcionamiento de la herramienta *Collect Events*



Fuente: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//005p0000003s000000>
[Consulta 13/07/2015]

- **Cálculo de la distancia de banda.** Mediante la herramienta *Incremental Spatial Autocorrelation* se mide el grado de autocorrelación espacial encontrado para diversas distancias de banda asumidas. Las distancias de banda apropiadas son aquellas con altos valores de correlación espacial.
- **Test de Autocorrelación espacial G_i^* (Análisis de puntos calientes).** Mediante el cálculo del estadístico G_i^* de Getis y Ord (1995)³² se indaga la autocorrelación espacial de acuerdo al puntaje $Z(G_i^*)$ obtenido.
- **Ranking cuantitativo de los distritos.** Se ordenan los distritos de acuerdo a los valores obtenidos para la siguiente función propuesta:

$$f(\bar{Z}(G_i^*)) = \bar{Z}(G_i^*) * r \quad (10)$$

Donde $\bar{Z}(G_i^*)$ es el valor promedio del puntaje $Z(G_i^*)$ a lo largo del distrito y r es una relación que existe entre el número de eventos correlacionados espacialmente en el distrito (i) dividido entre el número de eventos correlacionados totales.

5.2.4 Fase 4. Análisis estadístico Bayesiano y análisis de confiabilidad.

Obtenido el Ranking de distritos, se elige el(los) distrito(s) mayor puntuados para priorizar ahora las líneas de tubería que deben ser objeto de mantenimiento o rehabilitación.

³² ORD, J. K.; GETIS, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 27(4), 286-306.

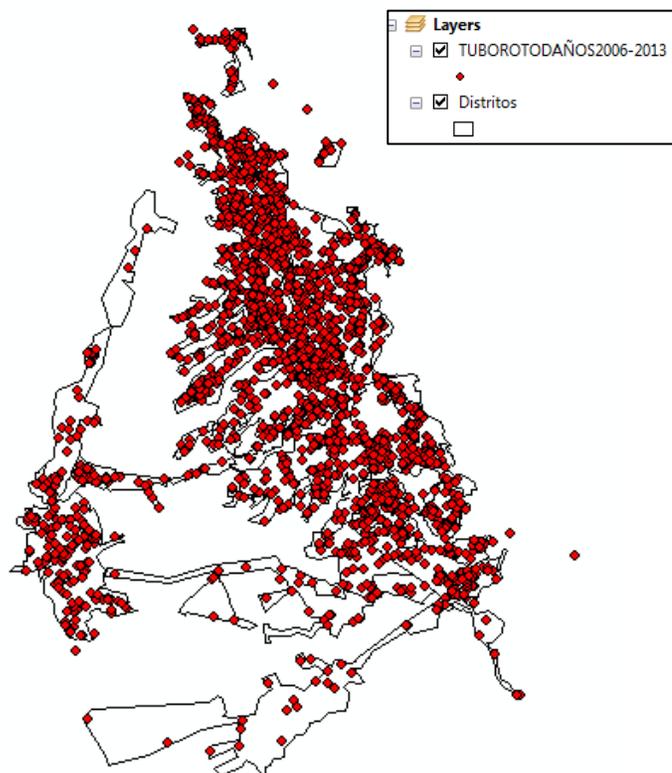
- **Análisis estadístico Bayesiano.** Mediante la ecuación (8) se calcula la probabilidad de daño de cada una de las tuberías del distrito elegido y se genera un mapa.
- **Análisis de Confiabilidad hidráulica.** Mediante la aplicación del algoritmo de priorización de líneas de tubería mostrado en el Anexo A se obtiene un listado de cambios prioritarios y se genera un mapa.
- **Ranking de tuberías.** De manera cualitativa de acuerdo a los mapas obtenidos los dos análisis anteriores, se construye el ranking final de tuberías de acuerdo a la necesidad de mantenimiento o rehabilitación.

6. RESULTADOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

6.1.1 Fase 1. Para el caso de estudio, desde el año 2006 hasta el año 2013 el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (a.m.b) registró los daños ocurridos en las tuberías de la red distribución en una base de datos compatible con el software ArcGIS, agrupándolos por año en un archivo de formato vectorial conocido como *shapefile**. La entidad geográfica utilizada para representar los daños en tuberías, como es de esperarse, es el punto.

Figura 11. *Shapefile* de daños 2006 – 2013.



Fuente: El Autor.

Se encontró siempre la existencia de los atributos mínimos. Sin embargo debido a que el registro de los daños fue realizado por diferente personal del a.m.b y en diferentes épocas, se presentó ciertas diferencias en cuanto al número y tipo de

* Un *shapefile* es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y los atributos de las entidades geográficas.

datos, entre los atributos asignados año por año, lo cual hizo necesaria la unificación de atributos. En los siguientes cuadros se puede observar la diferencia entre los atributos asignados a los daños en diferentes años.

Cuadro 2. Atributos asignados en diferentes años

AÑO 2008 NOMBRE DE LOS CAMPOS		AÑO 2010 NOMBRE DE LOS CAMPOS		AÑO 2012 NOMBRE DE LOS CAMPO	
OBJECTID	TIPOSERV	OBJECTID	tipodaño	OBJECTID	HORSOL_OT
CODIGO	ID_TUBERIA	x	diametro	NUM_OT	FCHINIE_OT
X	TIPO_TUBO	y	fecha_soli	DIREC_OT	HORINE_OT
Y	DISTRITO	Expr1002	id_tuberia	BARRIO_OT	FCHFINE_OT
COD_MUNICI	BARREAL	direccion	tipo_tubo	MUNIC_OT	HORFINE_OT
DIRECCION	DIAMETRO_1	orden	diametro_1	RESULT_OT	COORDX_GEO
ORDEN	UNIDAD	barrio	sector	UBICAC_OT	COORDY_GEO
NOMBRE_MUN	Expr1015	medio	distance_1	DIAM_OT	ID_TUB_GEO
FECHASOLIC		Expr1015		MATER_OT	TIPTUB_GEO
				MATREMP_OT	SECTOR_GEO
				PROFUND_OT	FCHTUB_GEO
				FCHSOL_OT	

Fuente: El Autor.

Para el caso de la inexistencia de atributos no críticos, se utilizó el *Spatial Join* de ArcGIS. En seguida se unificó el nombre y el tipo de dato de cada uno de los atributos mediante el uso de la extensión de ArcGIS, ETGeoWizards que permite editar la tabla de atributos de los *Shapefiles*, eliminando y modificando campos.

6.1.2 Fase 2. Los histograma mostrados a continuación reflejan que el 70% de los daños son conformados por los 9 tipos de daños más frecuentes, los cuales a su vez conforman el 72.92% del total de los datos. Los tipos de daños objeto del análisis subsiguiente los que se muestran en el Cuadro 3.

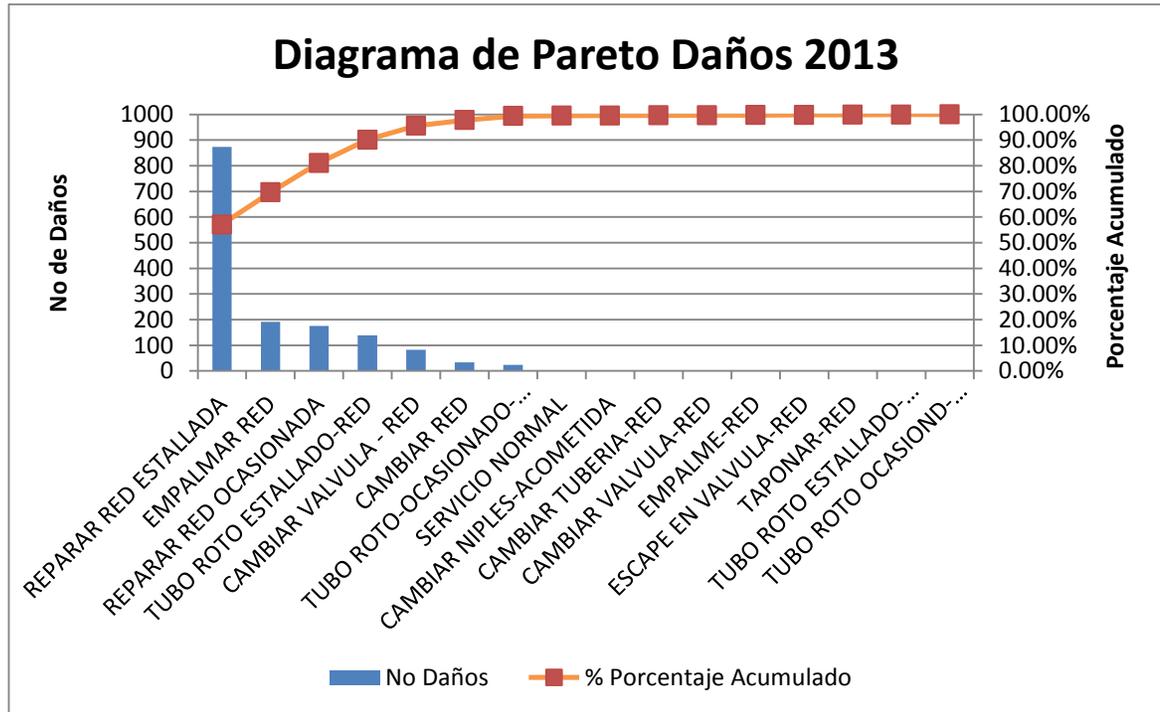
Cuadro 3. Tipos de daños significativos

Reparar red estallada	Tubo roto estallado-acometida	Tubo roto por medidor robado
Tubo roto antes del medidor	Tubo roto estallado-red	Tubo roto-ocasionado-matriz
Tubo roto daños	Tubo roto ocasionado-domiciliaria	Tubo roto daños

Fuente: El Autor.

En la Figura 12 se presenta un Histograma de Pareto para las actividades de mantenimiento (Daños) registrados en el año 2013.

Figura 12. Histograma de Pareto Daños año 2013



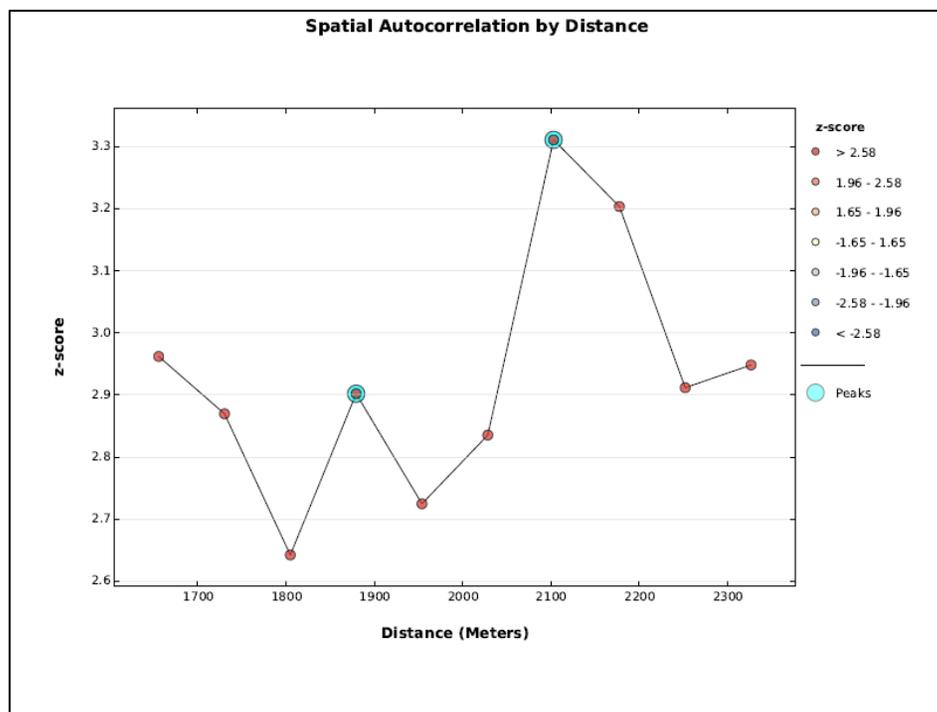
Fuente: El Autor

6.1.3 Fase 3. Para el agrupamiento de los daños se asignó una tolerancia X y Y de 200 metros, lo cual genera holgadamente más de 30 agrupaciones (*clusters*).

Fuente: El Autor

- **Cálculo de la distancia de Banda.** Se examina cómo lo autocorrelación espacial varía con la elección de diferentes distancias. Se deben preferir distancias de banda que produzcan picos en la autocorrelación espacial.

Figura 14. Autocorrelación espacial vs distancia de Banda - Daños 2013

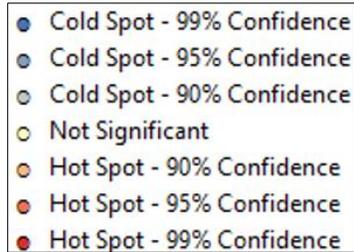


Fuente: El Autor

Distancia de banda elegida: 1879.44 m y 2103.04 m

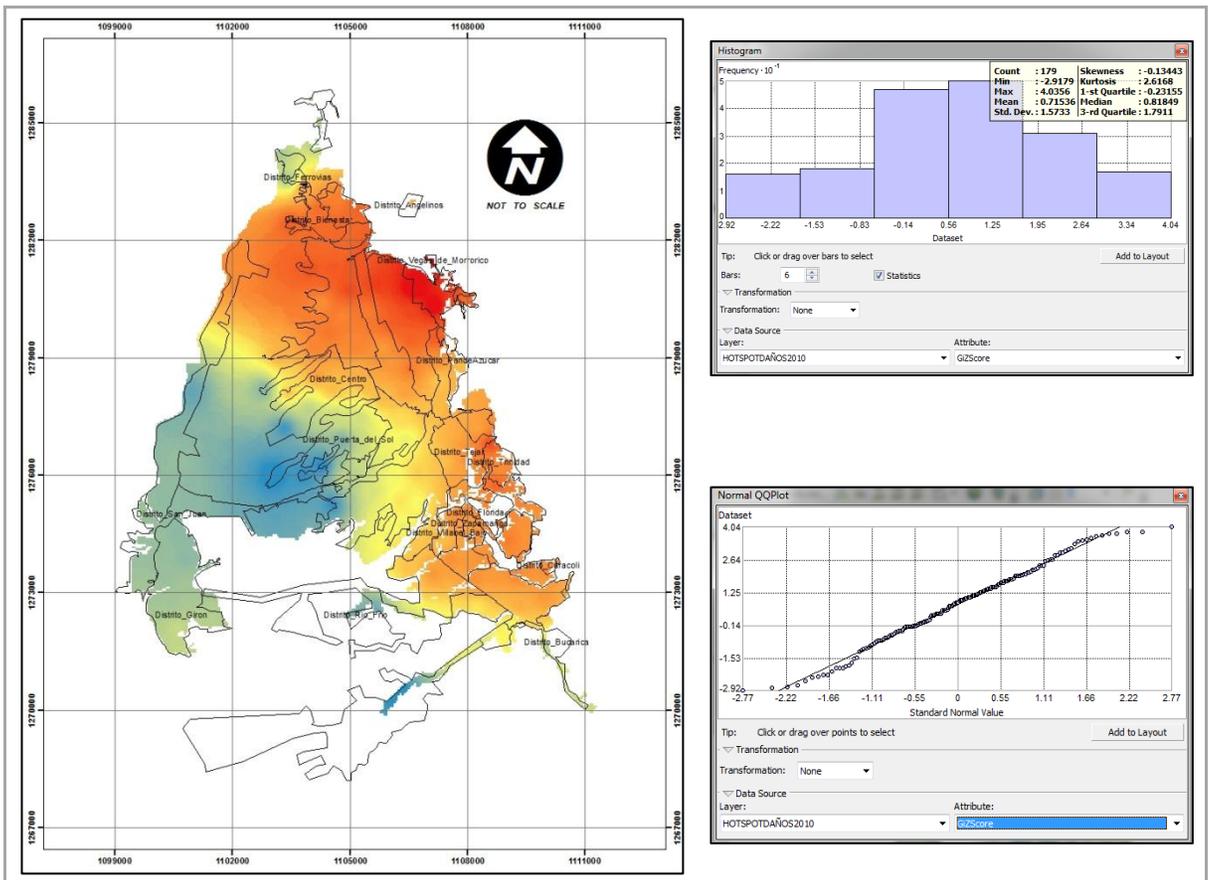
- **Test de Autocorrelación Hot-Spot.**

Figura 15. Niveles de confianza para la existencia de *Hot/Cold-Spots*



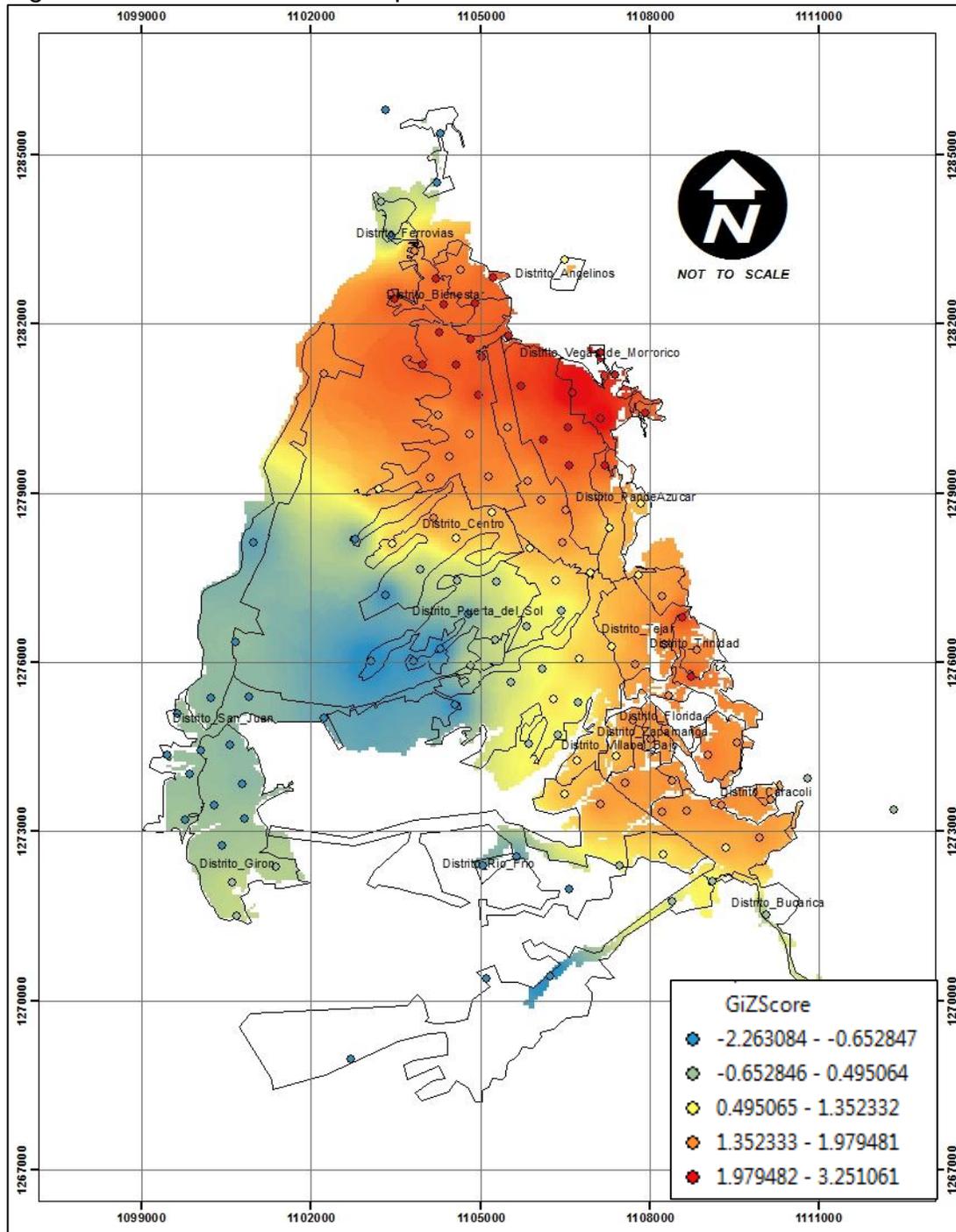
Fuente: El Autor

Figura 16. Resumen Análisis *Hot-Spots* para los daños año 2013



Fuente: El Autor

Figura 17. Visualización de G_i^* para los *clusters* creados – año 2013

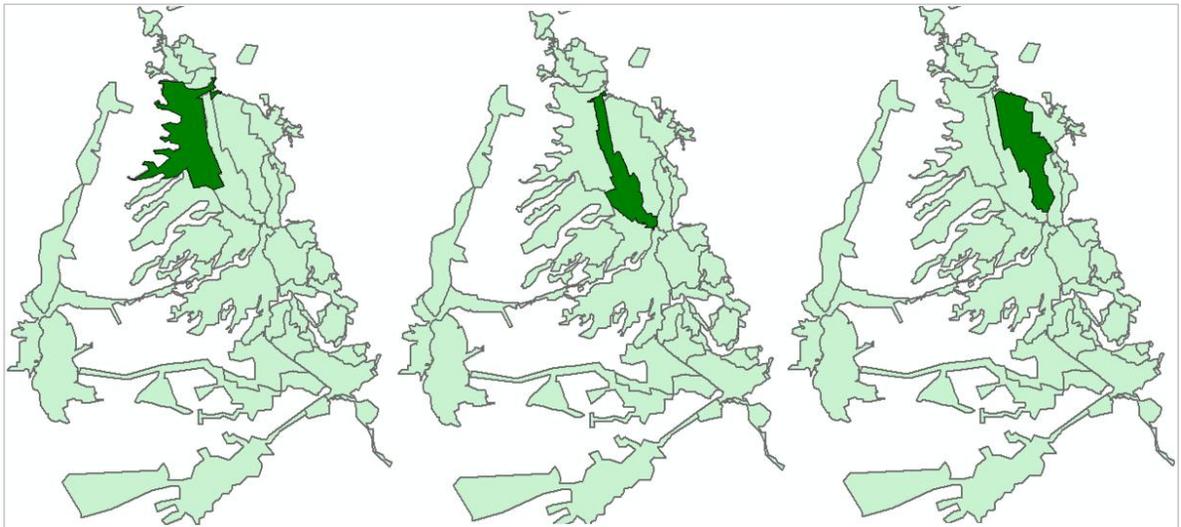


Fuente: El Autor

- **Ranking de distritos hidráulicos.**

A partir del test de autocorrelación espacial de los daños efectuado anteriormente, en primera instancia puede identificarse cuantitativamente que con un nivel de confianza del 95%, existe concentración de daños en los distritos Estadio, Morro Alto, y Norte.

Figura 18. Distritos Estadio, Morro Alto y Norte



Fuente: El Autor

Asimismo, se realiza el ranking cuantitativo de los distritos según

- **Ranking cuantitativo de los distritos.**

Se ordenan los distritos de acuerdo a los valores obtenidos para la función propuesta en la Ecuación 10. Los resultados de la clasificación y coherentes con el ranking cualitativo realizado anteriormente se presenta en el Cuadro 4. Asimismo, en la

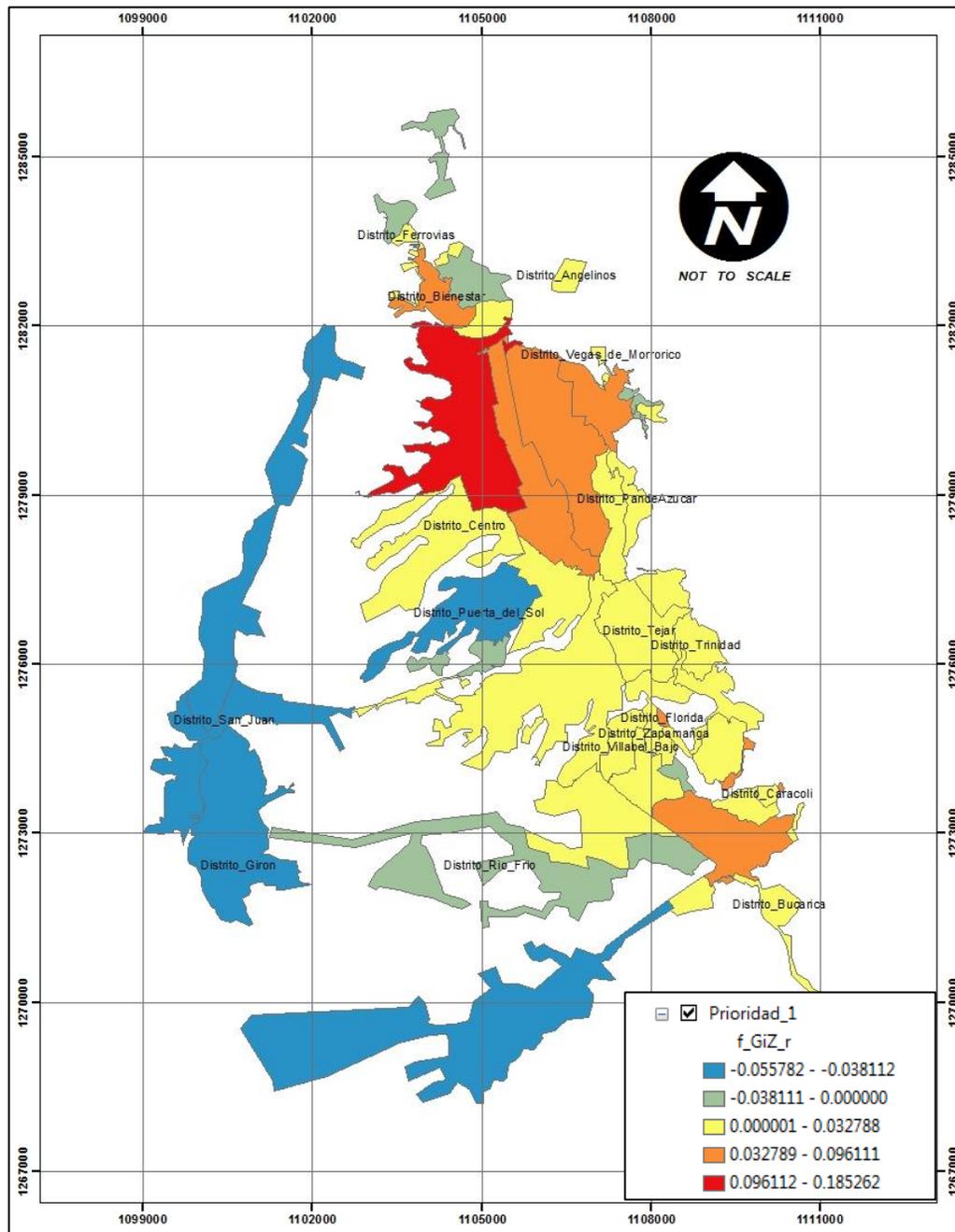
Figura 19 Visualización gráfica de la clasificación cuantitativa de los distritos según el resultado promedio de $\bar{Z}(G_i^*)$ por distrito y la normalización de los eventos correlacionados espacialmente.

Cuadro 4. Clasificación cuantitativa de los distritos según el resultado promedio de $\bar{Z}(Gi^*)$ por distrito y la normalización de los eventos correlacionados espacialmente

Distrito	Cnt_Distri	Ave_GiZsco	r	f_GiZ_r	Prioridad
Distrito_Estadio	12	2.0070	0.092307692	0.185261538	1
Distrito_Norte	6	2.0824	0.046153846	0.096110769	2
Distrito_La_Flora	3	3.0383	0.023076923	0.070114615	3
Distrito_Morro_Alto	5	1.5224	0.038461538	0.058553846	4
Distrito_Bienestar	3	2.1464	0.023076923	0.049532308	5
Distrito_Florida	4	1.5261	0.030769231	0.046956923	6
Distrito_Tejar	3	1.4208	0.023076923	0.032787692	7
Distrito_La_Esperanza_(Fuera_de_Servicio)	2	2.0491	0.015384615	0.031524615	8
Distrito_Trinidad	2	2.0475	0.015384615	0.0315	9
Distrito_PandeAzucar	3	1.3079	0.023076923	0.030182308	10
Distrito_Cabecera	2	1.9404	0.015384615	0.029852308	11
Distrito_Malpasso	7	0.5237	0.053846154	0.028199231	12
Distrito_La_Cumbre	2	1.7310	0.015384615	0.026630769	13
Distrito_Zapamanga	2	1.6390	0.015384615	0.025215385	14
Distrito_Villabel_Alto	2	1.6288	0.015384615	0.025058462	15
Distrito_Vegas_de_Morrórico	1	3.1994	0.007692308	0.024610769	16
Distrito_Cañaveral	3	1.0479	0.023076923	0.024182308	17
Distrito_Villabel_Bajo	2	1.4033	0.015384615	0.021589231	18
Distrito_Morro_Bajo	4	0.6235	0.030769231	0.019184615	19
Distrito_El_Carmen	1	2.1543	0.007692308	0.016571538	20
Distrito_Regadero	1	2.0882	0.007692308	0.016063077	21
Distrito_Buenos_Aires	1	2.0672	0.007692308	0.015901538	22
Distrito_Caracoli	1	1.7322	0.007692308	0.013324615	23
Distrito_Centro	7	0.2228	0.053846154	0.011996923	24
Distrito_Ferrovias	1	1.3827	0.007692308	0.010636154	25
Distrito_Angelinos	1	1.2084	0.007692308	0.009295385	26
Distrito_Bucarica	4	0.2615	0.030769231	0.008046154	27
Distrito_Cafe_Madrid_Fuera_de_Servicio	2	-0.6311	0.015384615	-0.009709231	28
Sin Distrito	9	-0.1559	0.069230769	-0.010793077	29
Distrito_Colorados	2	-0.7868	0.015384615	-0.012104615	30
Distrito_La_Iglesia	2	-1.1816	0.015384615	-0.018178462	31
Distrito_Rio_Frio	4	-0.7025	0.030769231	-0.021615385	32
Distrito_San_Juan	5	-0.9909	0.038461538	-0.038111538	33
Distrito_Ruitoque	3	-1.8481	0.023076923	-0.042648462	34
Distrito_Puerta_del_Sol	6	-1.0324	0.046153846	-0.047649231	35
Distrito_Giron	12	-0.6043	0.092307692	-0.055781538	36

Fuente: El Autor

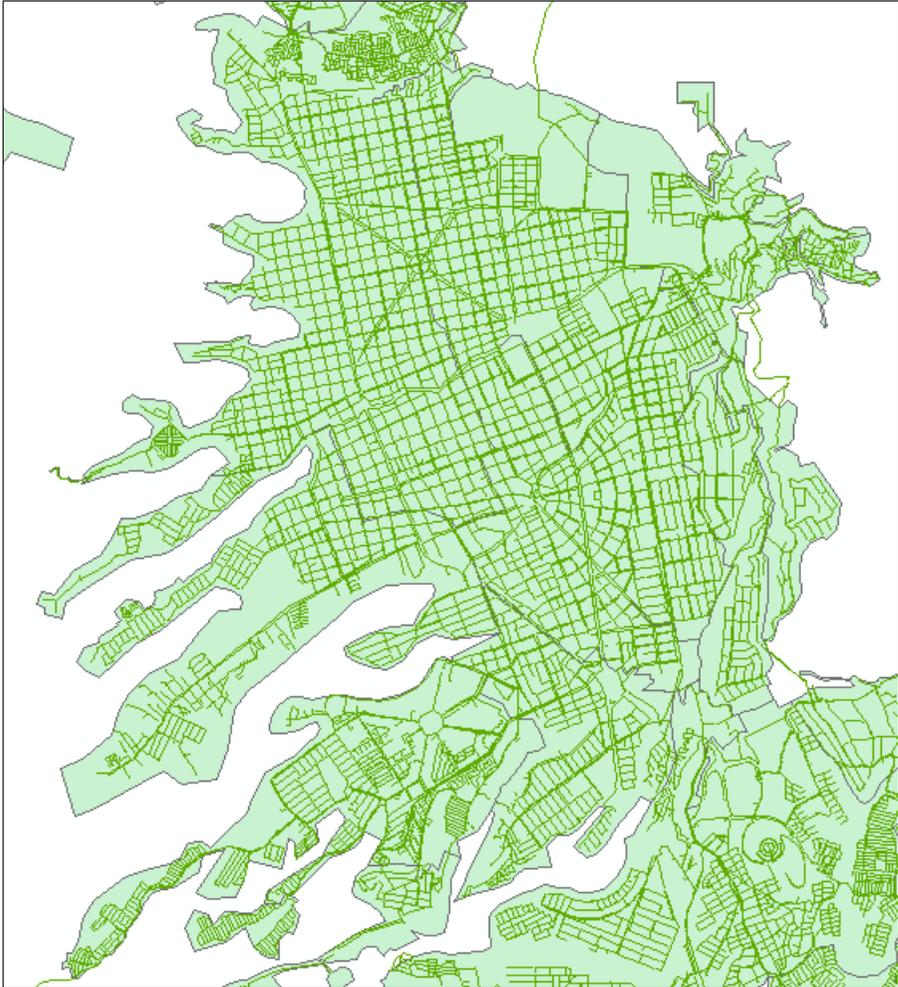
Figura 19. Visualización gráfica de la clasificación cuantitativa de los distritos según el resultado promedio de $\bar{Z}(G_i^*)$ por distrito y la normalización de los eventos correlacionados espacialmente



Fuente: El Autor

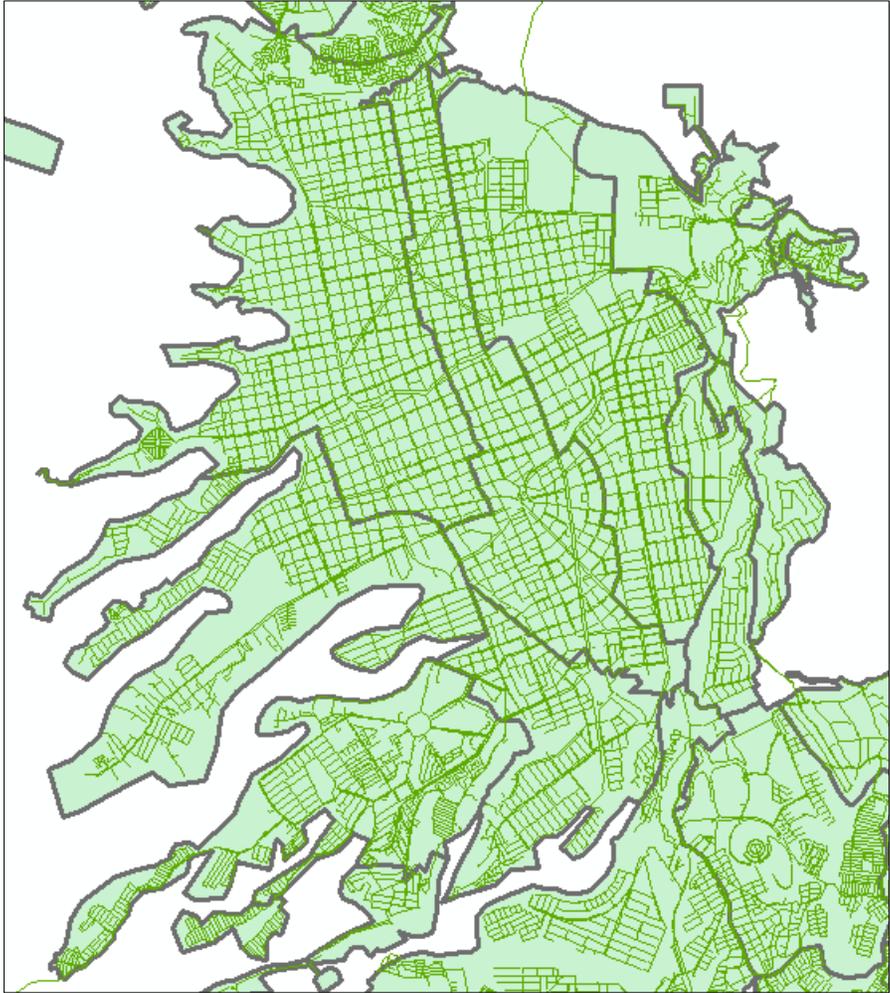
6.1.4 Fase 4.

Figura 20. Vista general de tuberías de la red de distribución



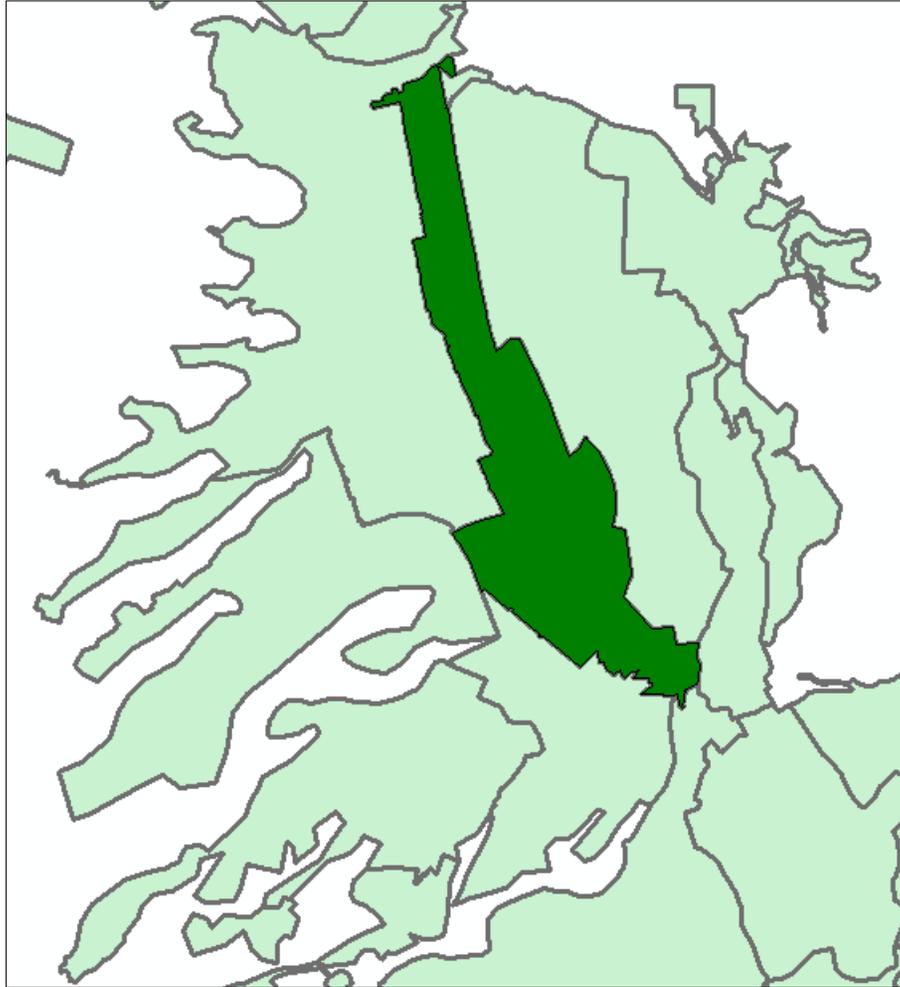
Fuente: El Autor

Figura 21. Vista general de tuberías y distritos de la red de distribución



Fuente: El Autor

Figura 22. Distrito Morro Alto



Fuente: El Autor

El distrito “Morro Alto” de la red de distribución de Agua de la ciudad de Bucaramanga, cuenta aproximadamente con 10000 suscriptores distribuidos en los estratos 2 a 4.

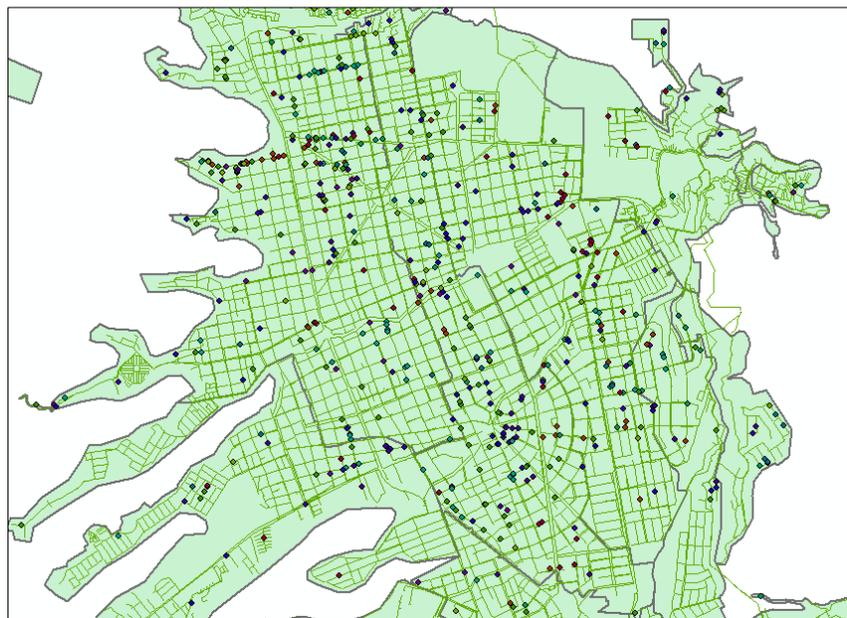
- **Análisis Estadístico Bayesiano.**

Cuadro 5. Características consideradas para el análisis Bayesiano

	0-20 (E ₁)
E: EDAD (años)	20-40 (E ₂)
	40-60 (E ₃)
	60-80 (E ₄)
	AC (Asbesto Cemento) (M ₁)
M: MATERIAL	HD (Hierro Dúctil) (M ₂)
	HF (Hierro Fundido) (M ₃)
	HG (Hierro Galvanizado) (M ₄)
	PVC (M ₅)
	[0-4] (D ₁)
D: DIÁMETRO (in)	[4-8] (D ₂)
	[8-12] (D ₃)
	[12-16] (D ₄)
	[16-20] (D ₅)
	0-15 (L ₁)
L: LONGITUD (m)	15-30 (L ₂)
	30-45 (L ₃)
	45- (L ₄)

Fuente: El Autor

Figura 23. Eventos de daño en la red de distribución año 2013



Fuente: El Autor

Cuadro 6. Probabilidades a priori no condicionales - Morro Alto – año 2013

	Número Total Tuberías		1885
	Número de Eventos de daño		103
	P(f)		0.05464
n (E1)	1198	P(E1)	0.6355
n (E2)	74	P(E2)	0.0393
n (E3)	120	P(E3)	0.0637
n (E4)	493	P(E4)	0.2615
n (M1)	333	P(M1)	0.1767
n (M2)	67	P(M2)	0.0355
n (M3)	66	P(M3)	0.0350
n (M4)	289	P(M4)	0.1533
n (M5)	1130	P(M5)	0.5995
n (D1)	1221	P(D1)	0.6477
n (D2)	494	P(D2)	0.2621
n (D3)	117	P(D3)	0.0621
n (D4)	35	P(D4)	0.0186
n (D5)	18	P(D5)	0.0095
n (L1)	1214	P(L1)	0.6440
n (L2)	138	P(L2)	0.0732
n (L3)	118	P(L3)	0.0626
n (L4)	415	P(L4)	0.2202

Fuente: El Autor

Cuadro 7. Probabilidades a priori Condicionales - Morro Alto – año 2013

n (E1 F)	59	P(E1 F)	0.5728
n (E2 F)	9	P(E2 F)	0.0874
n (E3 F)	5	P(E3 F)	0.0485
n (E4 F)	30	P(E4 F)	0.2913
n (M1 F)	19	P(M1 F)	0.1845
n (M2 F)	1	P(M2 F)	0.0097
n (M3 F)	2	P(M3 F)	0.0194
n (M4 F)	33	P(M4 F)	0.3204
n (M5 F)	48	P(M5 F)	0.4660
n (D1 F)	83	P(D1 F)	0.8058
n (D2 F)	12	P(D2 F)	0.1165
n (D3 F)	5	P(D3 F)	0.0485
n (D4 F)	2	P(D4 F)	0.0194
n (D5 F)	1	P(D5 F)	0.0097
n (L1 F)	13	P(L1 F)	0.1262
n (L2 F)	9	P(L2 F)	0.0874
n (L3 F)	12	P(L3 F)	0.1165
n (L4 F)	69	P(L4 F)	0.6699

Fuente: El Autor

Mediante el teorema de Bayes, es posible calcular las probabilidades de falla dada alguna característica:

Cuadro 8. Probabilidades de falla Condicionales – Distrito Morro Alto

P(F E1)	0.0492
P(F E2)	0.1216
P(F E3)	0.0417
P(F E4)	0.0609
P(F M1)	0.0571
P(F M2)	0.0149
P(F M3)	0.0303
P(F M4)	0.1142
P(F M5)	0.0425
P(F D1)	0.0680
P(F D2)	0.0243
P(F D3)	0.0427
P(F D4)	0.0571
P(F D5)	0.0556
P(F L1)	0.0107
P(F L2)	0.0652
P(F L3)	0.1017
P(F L4)	0.1663

Fuente: El Autor

Finalmente se evalúa el estado de condición C_x de cada tubería y con la ecuación 8 se halla la probabilidad de daño.

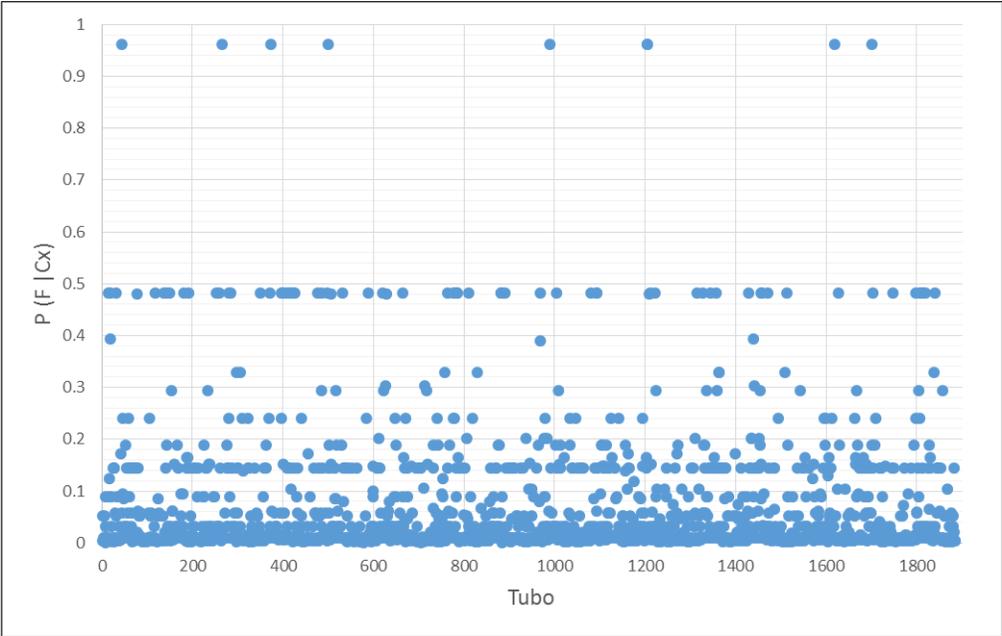
Cuadro 9. Distribución de Probabilidades de Daño - Distrito Morro Alto

Probabilidad de Daño	Muy Baja (0-20%]	Baja (20-40%]	Media (40-60%]	Alta (60-80%]	Muy Alta (80-100%]
Cantidad de Tuberías	1741	68	67	0	9
	92.36%	3.61%	3.55%	0.00%	0.48%

Fuente: El Autor

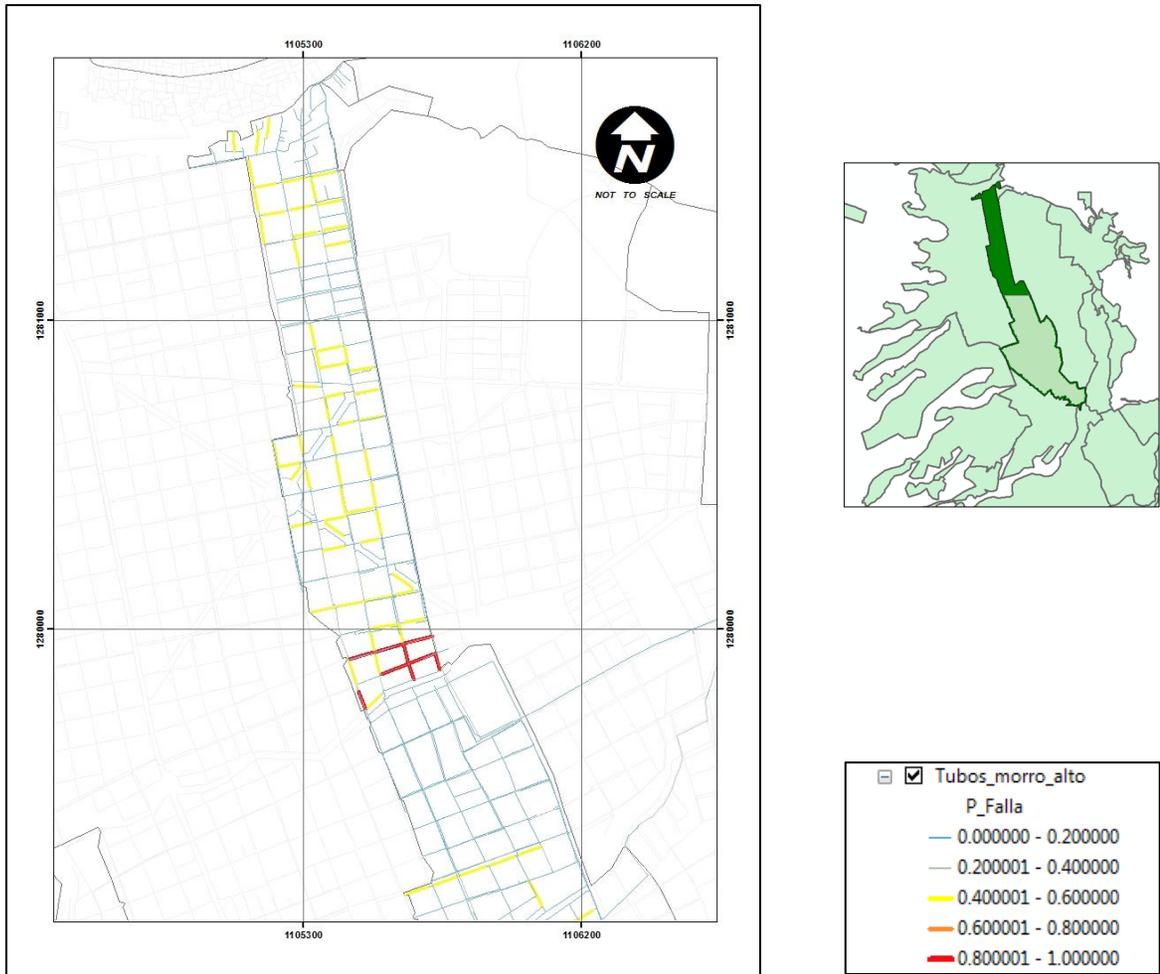
Según este análisis bayesiano, la mayor probabilidad (muy alta) correspondió al siguiente estado de condición: Edad entre 20 y 40 años, Material HG (Hierro Galvanizado), Diámetro menor a 4” y longitud mayor a 45m.

Figura 24. Distribución de Probabilidades de Daño - Distrito Morro Alto



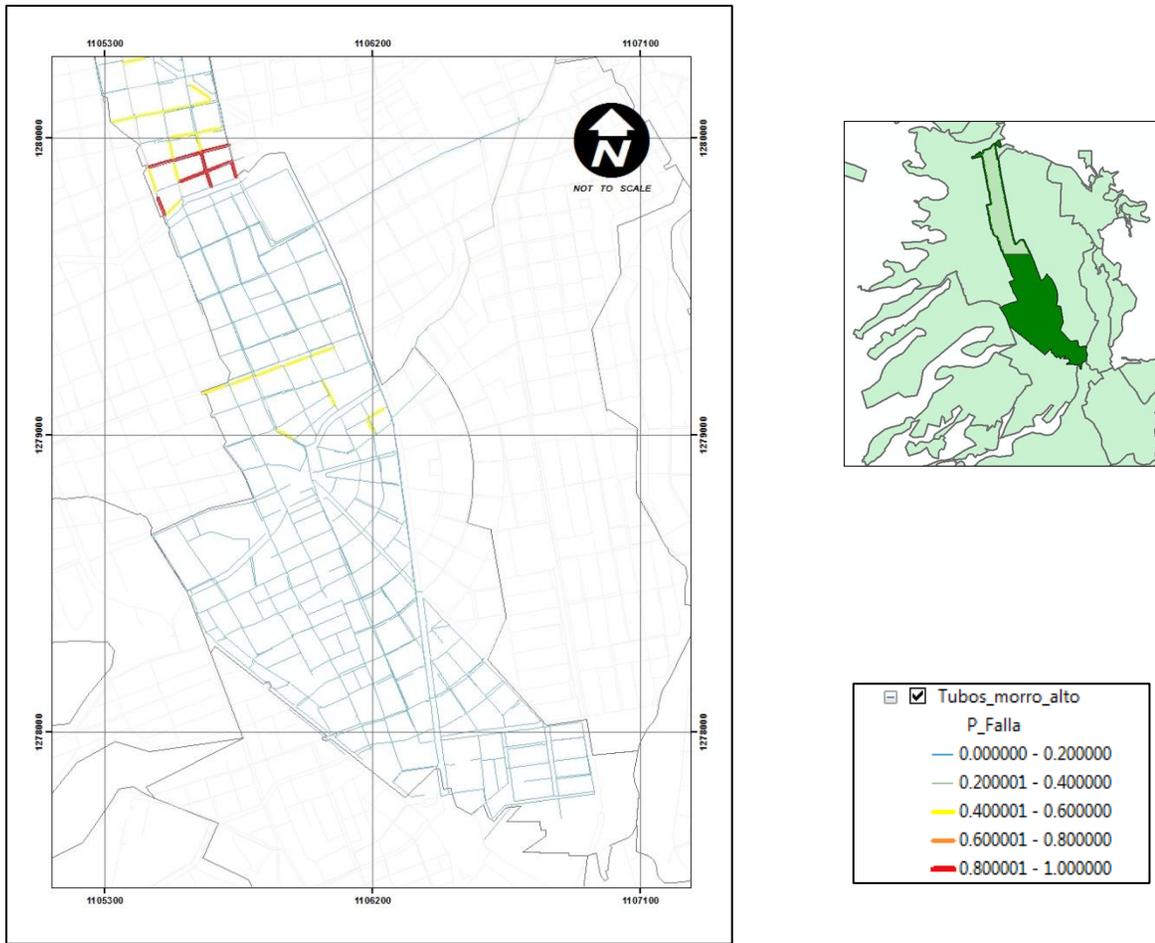
Fuente: El Autor

Figura 25. Mapa de probabilidades de Daño - Zona Norte Distrito Morro Alto



Fuente: El Autor

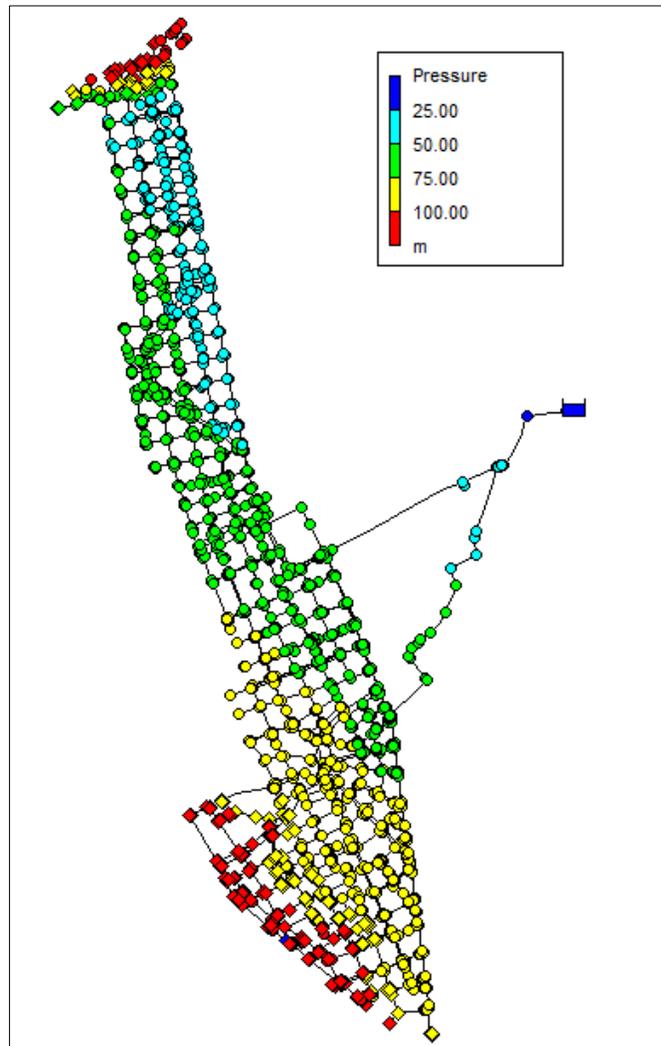
Figura 26. Mapa de probabilidades de Daño - Zona Sur Distrito Morro Alto



Fuente: El Autor

- **Análisis Confiabilidad Hidráulica.** Mediante la aplicación del algoritmo de mostrado en el Anexo A, es posible calcular un mapa de prioridades de reposición con el fin de mejorar la confiabilidad hidráulica del distrito, cuidando del nivel de presiones y el costo simultáneamente.

Figura 27. Modelo Hidráulico de la red del distrito Morro Alto – Epanet



Fuente: El Autor

El modelo hidráulico del distrito Morro Alto cuenta con 65 [km] de tubería correspondientes a 3077 líneas de tubería con diámetros entre 25 y 500 [mm]. El caudal de demanda máximo es de 135.78 [LPS]. Topográficamente el distrito abarca un área aproximada de 233 hectáreas en un rango de elevaciones de 184 [m].

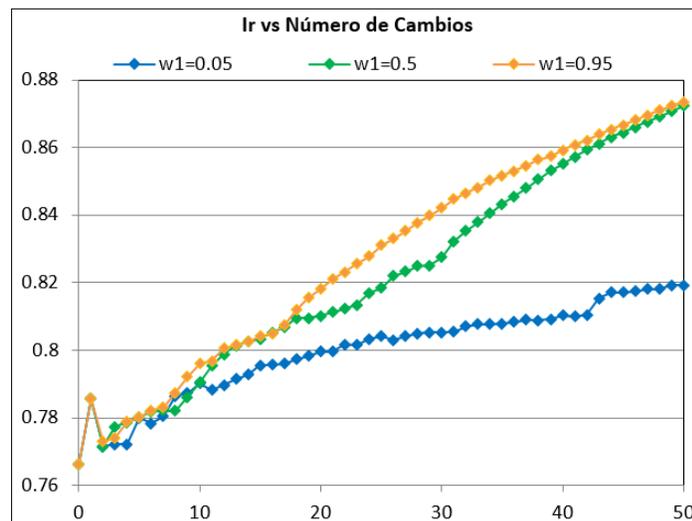
Se asignan los siguientes datos de entrada al Algoritmo descrito en el Anexo A

- Diámetro máximo del nuevo tubo= 500 [mm]
- ϵ de Darcy-Weisbach para el nuevo tubo= 0.0015

- Presión mínima = 15 [m.c.a]
- $K_{\text{costo}} = 642.48 [\$/\text{m} \cdot \text{mm}^{1.0692}]$
- $n_{\text{costo}} = 1.0692$
- Parámetros de emisores = Ya existen
- Costo del agua = $K_{\text{agua}} = 1400 \text{ } \$/\text{m}^3$.
- w_1 = Se asignan 3 diferentes valores (0.05, 0.5, 0.95), que reflejan importancias baja, media y alta para cada una de las funciones objetivo: Índice de Resiliencia y Coeficiente de Uniformidad
- Parámetro p del método = 350 (el máximo posible)
- Número de cambios = 50

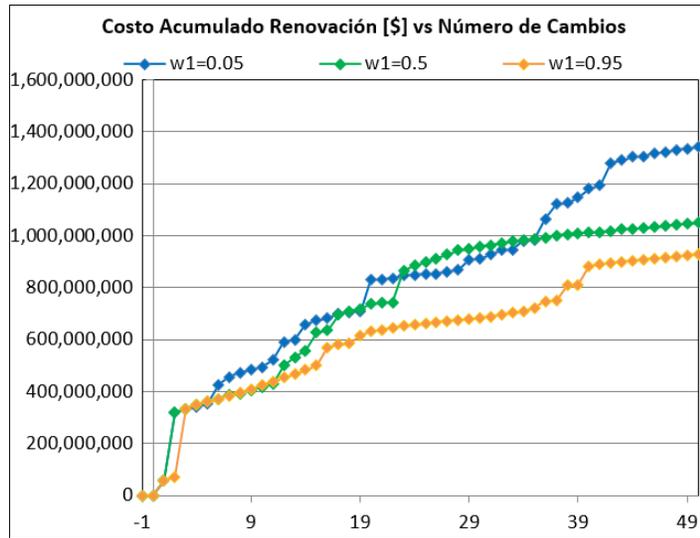
Resultados:

Figura 28. Ir vs Número de cambios - Morro Alto



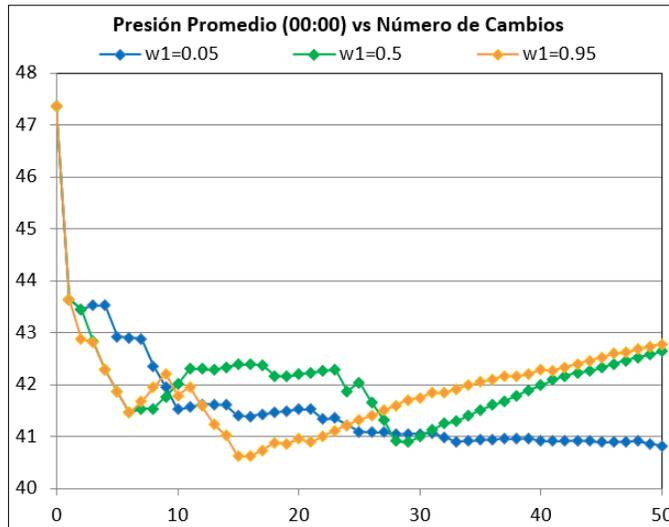
Fuente: El Autor

Figura 29. Costo acumulado de renovación vs Número de cambios –Morro Alto



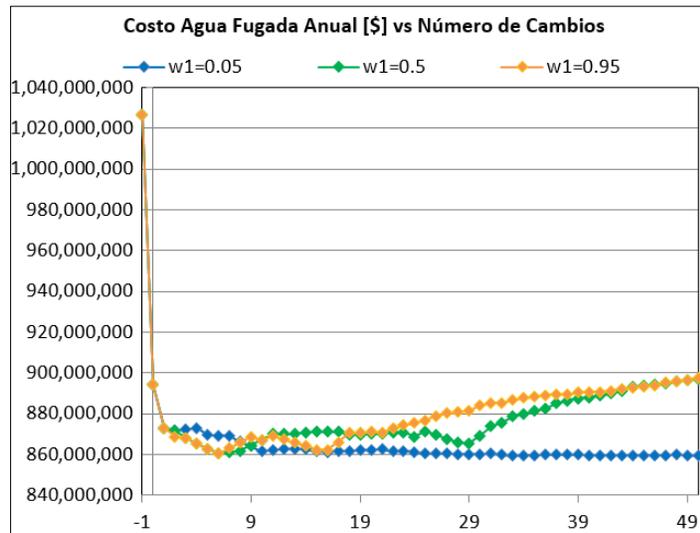
Fuente: El Autor

Figura 30. Presión promedio vs Número de cambios –Morro Alto



Fuente: El Autor

Figura 31. Costo agua fugada anual vs Número de cambios –Morro Alto



Fuente: El Autor

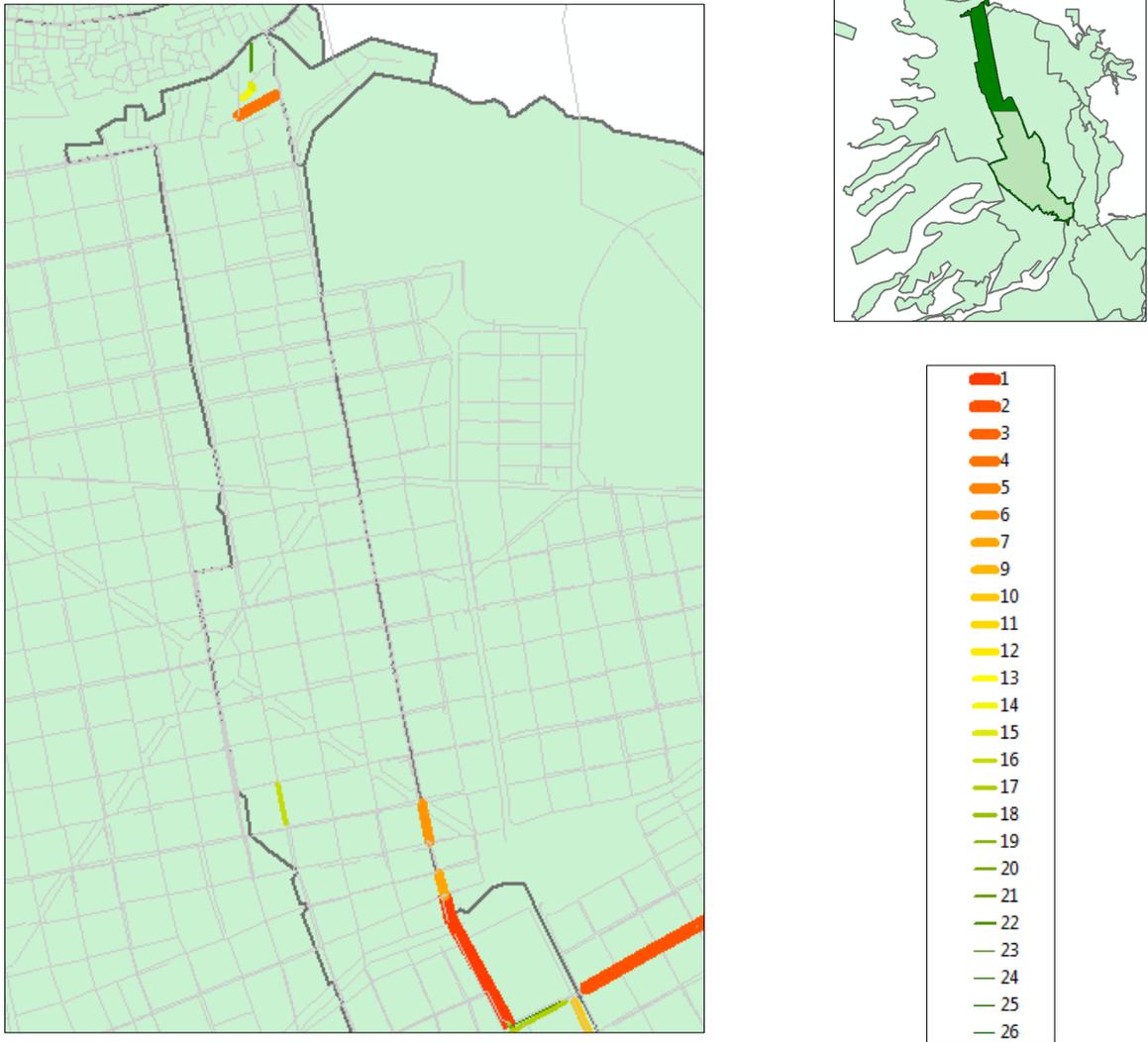
Un análisis cualitativo de los gráficos revela que:

1. Respecto del índice de resiliencia (confiabilidad): las curvas verde y naranja son las más favorables.
2. Respecto del costo de renovación: La curva naranja representa menores costos de renovación. Las curvas verde y azul son prácticamente iguales hasta poco antes del cambio 40.
3. Respecto del nivel de presiones y las fugas: Hay dos picos de presión promedio bajos favorables de aproximadamente 40.7 [m.c.a] a los 16 cambios en la curva naranja y a los 28 cambios en la curva verde y a los 50 cambios en la azul.

Con lo anterior se descarta la curva azul en primera instancia, ya que alcanza niveles de presiones bajos después de muchos cambios, es la curva más costosa desde el cambio 40 y la menos favorable para el incremento de la confiabilidad.

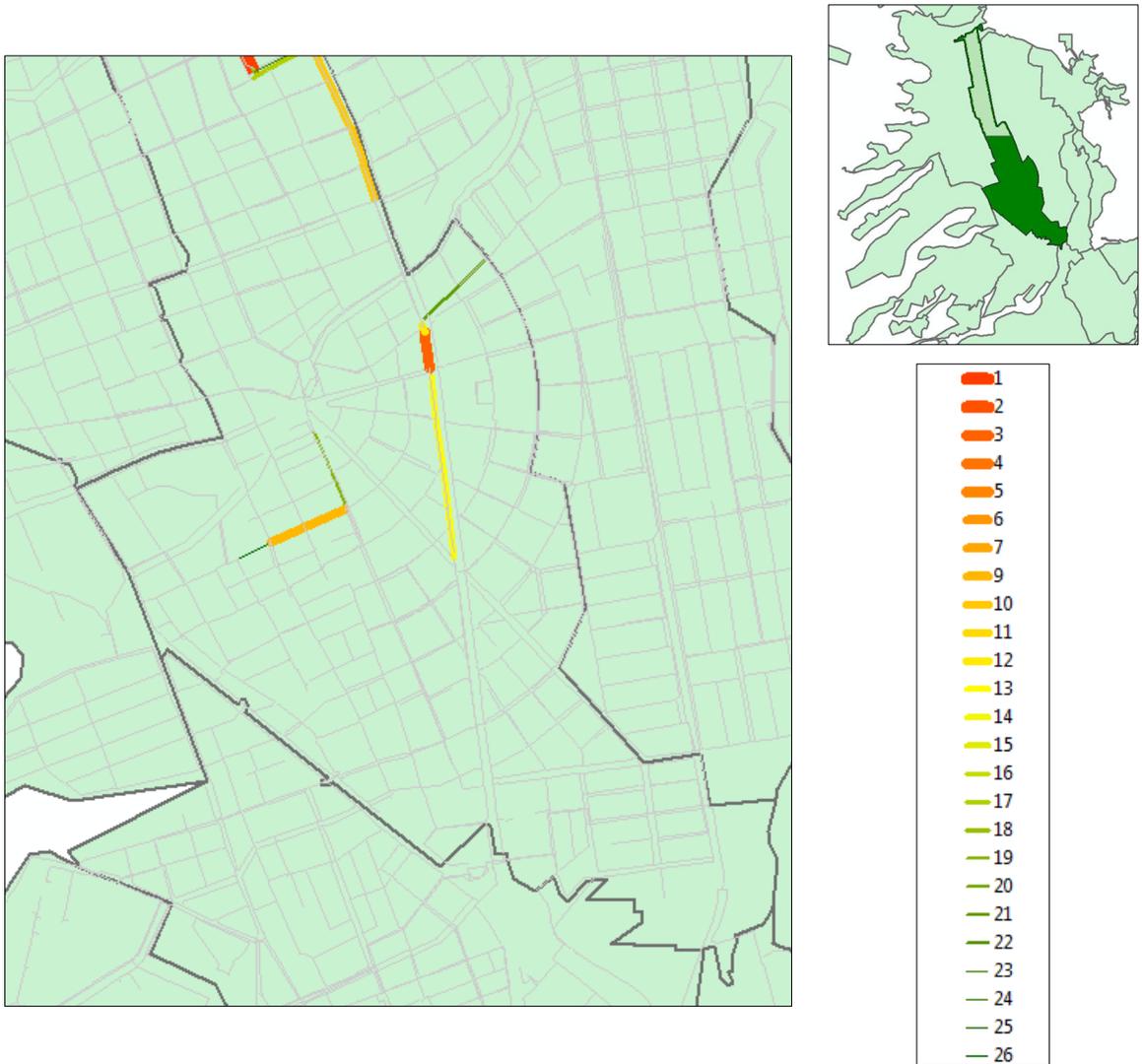
La decisión es entonces entre 15 cambios para la curva naranja y 30 cambios para la verde. El factor común de éstas soluciones es un nivel igual y bajo de presión con el correspondiente bajo nivel en el costo de fugas. Se opta por la opción de los 28 cambios para la curva verde por ser más favorable para la confiabilidad.

Figura 32. Mapa de prioridades por Confiabilidad - Zona Norte Morro Alto



Fuente: El Autor

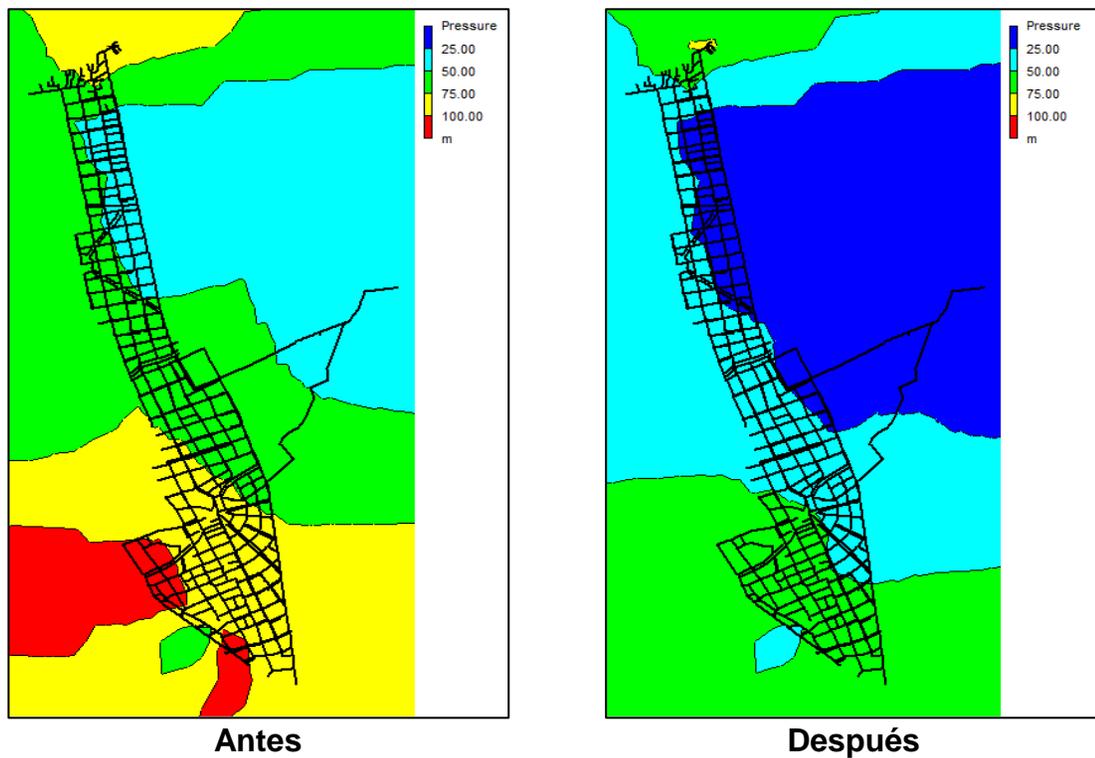
Figura 33. Mapa de prioridades por Confiabilidad - Zona Sur Morro Alto



Fuente: El Autor

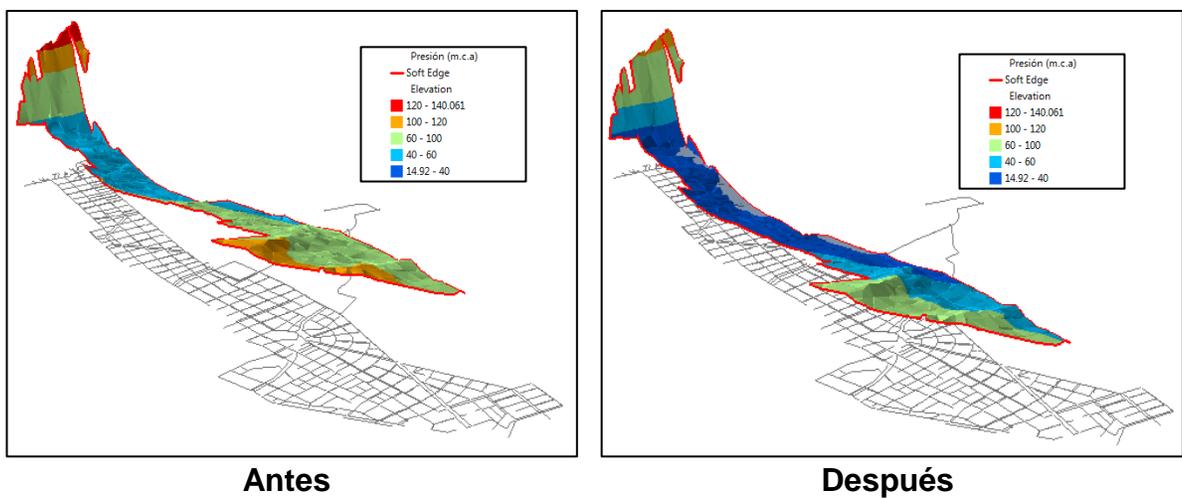
En la Figura 34 se presenta la distribución de presiones del distrito Morro Alto antes y después de realizar el análisis de confiabilidad. Asimismo, en la Figura 35 se presentan los planos de presiones del Distrito Morro Alto antes y después de realizar el análisis de confiabilidad. Esta Figura refleja la reducción optimizada de las presiones, además de una uniformización de las presiones debido a que se disminuyó el rango entre la presión mínima y la presión máxima. Cabe aclarar que esta reducción de presiones no implica deterioro en la calidad del servicio. Siempre la metodología está controlada por la restricción de presión mínima, para un nivel de complejidad Alto (15 m.c.a.), según los lineamientos del RAS-2000.

Figura 34. Distribución de presiones antes y después de realizar el análisis de confiabilidad



Fuente: El Autor

Figura 35. Planos de presiones del distrito Morro Alto- Antes y después de realizar el análisis de confiabilidad



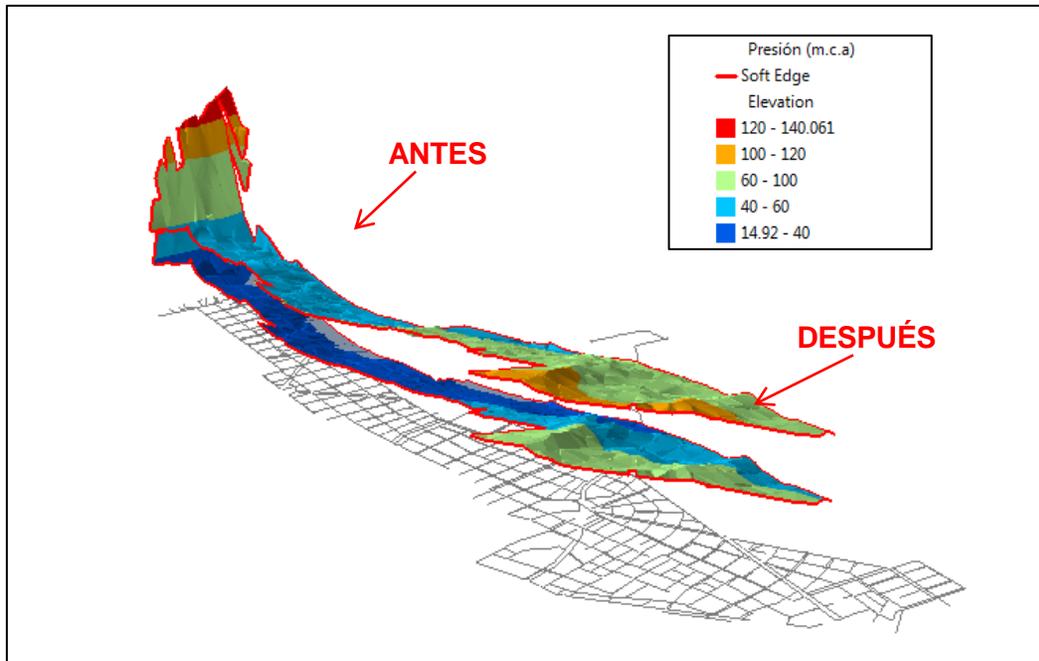
Fuente: El Autor

La

Figura 35 muestra como las presiones que oscilaban inicialmente entre 60 y 100 m.c.a fueron disminuidas a un intervalo entre 40 y 60 m.c.a. De manera similar las presiones entre 40 y 60 m.c.a fueron disminuidas a un intervalo entre 15 y 40 m.c.a. En este caso en ninguno de los nodos que tienen demanda se afecta la presión mínima de 15 m.c.a. En la Figura 36 se pueden observar los planos de presiones superpuestos antes y después del análisis de confiabilidad y con la misma escala de presiones.

Es importante resaltar que la reducción de presiones ayuda a que las tuberías estén sometidas a un esfuerzo de trabajo menor. Además de que presiones menores en las redes implican menores pérdidas y fugas, lo anterior es debido a la proporcionalidad directa entre el caudal y la presión, entre menor sea la presión menor será el caudal de fuga o de pérdidas.

Figura 36. Disminución de la presión promedio en el distrito Morro Alto y uniformización del plano de presiones después del análisis de confiabilidad



Fuente: El Autor

6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta metodología corresponde un intento de alineación de tres modelos de mejoramiento: dos modelos estadísticos y un modelo de análisis técnico del sistema. Se analizó la información geográfica del amb S.A. ESP almacenada como *shapefiles* correspondiente a los daños en red de distribución desde el año 2006 hasta el año 2013. El objeto de este análisis era encontrar cuales son los tipos de daños que tienen mayor influencia en el mantenimiento de las tuberías, a través de información histórica. Para lo anterior se construyeron diagramas de Pareto (Histogramas ordenados), de manera que los tipos de daños más frecuentes aparecieran en la parte izquierda del histograma. Lo anterior pretende encontrar según la hipótesis de Vilfredo Pareto (1848): Si un problema tiene muchas causas, el 20% de estas resolvería el 80% del problema y el 80% tan sólo resolvería el 20% del mismo.

Se encontró siempre la existencia de los atributos mínimos. Sin embargo debido a que el registro de los daños fue realizado por diferente personal del a.m.b y en diferentes épocas, se presentó ciertas diferencias en cuanto al número y tipo de datos, entre los atributos asignados año por año, lo cual hizo necesaria la unificación de atributos. En los siguientes cuadros se puede observar la diferencia entre los atributos asignados a los daños en diferentes años.

Los diagramas de Pareto mostraron que cerca del 70% de los daños aproximadamente están conformados por 9 tipos de daños más frecuentes, los cuales a su vez conforman el 72.92% del total de los datos. Estos tipos de daños fueron mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 10. Tipos de daños significativos

Reparar red estallada	Tubo roto estallado-acometida	Tubo roto por medidor robado
Tubo roto antes del medidor	Tubo roto estallado-red	Tubo roto-ocasionado-matriz
Tubo roto daños	Tubo roto ocasionado-domiciliaria	Tubo roto daños

Estos tipos de daños fueron el objeto del análisis realizado. Sin embargo, es necesario que el amb S.A. ESP incluya dentro de su información geográfica la información correspondiente a las acometidas, pues se encontró que el tipo de daño *Tubo roto estallado-acometida* corresponde a una de las causas más importantes en las redes de distribución.

Se aplicó por primera vez un test de autocorrelación espacial mediante el estadístico G_i^* , a la distribución de daños de las tuberías la una red de distribución real de la Ciudad de Bucaramanga, encontrando que sí existe autocorrelación

espacial local. Con algunos ajustes o variantes menores y encontrando que sigue existiendo autocorrelación espacial local en la distribución de los daños; la metodología propuesta conforma un soporte real para direccionar eficientemente los planes de mantenimiento y renovación de tuberías.

Se encontró para los diferentes años analizados que la distancia de banda fija corresponde a valores entre 2759 y 3745 metros, valores estimados con la herramienta *Incremental Spatial Autocorrelation*, valores que resultaron apropiados para el Test de Autocorrelación espacial (análisis de puntos calientes) mediante el cálculo del estadístico G_i^* de Getis y Ord (1995), de los daños registrados entre el año 2010 y 2013.

Se propuso una función para clasificar los distritos hidráulicos según una función propuesta basada en el valor promedio del puntaje $Z(G_i^*)$ a lo largo del distrito y un valor r que es una relación entre el número de eventos correlacionados espacialmente en el distrito (i) dividido entre el número de eventos correlacionados totales. Se encontró que los cinco (5) distritos que necesitan mayor prioridad de mantenimiento corresponden al Distrito Estadio, Distrito Norte, Distrito La Flora y Distrito Morro Alto y Distrito Bienestar (Ver Cuadro 4).

Se realizó un análisis estadístico bayesiano que relaciona la probabilidad de falla de una tubería a las características observadas en la misma (diámetro, material, pendiente, etc). Los resultados de este análisis estadístico bayesiano se basan en el estado de la condición C_x de cada tubería establecida en la Ecuación 8 y la distribución de probabilidades resultado de la según la misma se presenta en el cuadro 9.

Cuadro 11. Distribución de Probabilidades de Daño - Distrito Morro Alto

Probabilidad de Daño	Muy Baja (0-20%]	Baja (20-40%]	Media (40-60%]	Alta (60-80%]	Muy Alta (80-100%]
Cantidad de Tuberías	1741	68	67	0	9
	92.36%	3.61%	3.55%	0.00%	0.48%

Fuente: El Autor

Según este análisis bayesiano, la mayor probabilidad (muy alta) correspondió al siguiente estado de condición: Edad entre 20 y 40 años, Material HG (Hierro Galvanizado), Diámetro menor a 4" y longitud mayor a 45m.

Finalmente, se realizó un análisis de confiabilidad maximizando una función objetivo basada en dos medidas sustitutivas de confiabilidad el índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones, de manera que se pueda uniformizar el plano de presiones que según la bibliografía mejora la confiabilidad

de las redes de distribución. Este análisis permite establecer el costo recuperado por concepto de agua que se pierde en la red de distribución por concepto de fugas.

El análisis se realizó sobre el distrito Morro Alto (Cuarto en el Ranking de distritos realizado mediante la función propuesta basada en el valor promedio del puntaje $Z(G_i^*)$ a lo largo del distrito y el valor r). El distrito Morro Alto cuenta con 65 [km] de tubería correspondientes a 3077 líneas de tubería con diámetros entre 25 y 500 [mm]. El caudal de demanda máximo es de 135.78 [LPS]. Topográficamente el distrito abarca un área aproximada de 233 hectáreas en un rango de elevaciones de 184 [m].

Los datos de entrada usados para el análisis de confiabilidad son los siguientes:

- Diámetro máximo del nuevo tubo= 500 [mm]
- ϵ de Darcy-Weisbach para el nuevo tubo= 0.0015
- Presión mínima = 15 [m.c.a]
- $K_{\text{costo}} = 642.48 \text{ [\$}/m^*mm^{1.0692}]$
- $K_{\text{costo}} = 1.0692$
- Parámetros de emisores = Ya existen
- Costo del agua = $K_{\text{agua}} = 1400 \text{ \$}/m^3$.

De manera similar se asignaron tres (3) porcentajes de peso w_1 de (0.05, 0.5, 0.95), los cuales reflejan importancias baja, media y alta para cada una de las funciones objetivo: Índice de Resiliencia y Coeficiente de Uniformidad.

- Parámetro p del método = 350 (el máximo posible)
- Número de cambios = 50

Los resultados de este análisis muestran que para un porcentaje de importancia del 95% al Índice de Resiliencia y de 5% al coeficiente de uniformidad de presiones se obtienen los resultados más favorables del análisis, los cuales están asociados a menores costos de renovación cercanos a los 600 millones de pesos, una recuperación del costo del agua fugada correspondiente a 860 millones de pesos por año y una disminución del estado de presiones promedio el cual pasa de un estado inicial de 48 m.c.a en promedio a un valor de 40.7 m.c.a para el cambio 16 y de 42.7 en el cambio 50.

Se encontró que se deben renovar 2269 metros de tubería existente. Esta tubería es cambiada por diámetros superiores según el resultado del análisis. La distribución de los cambios de la tubería corresponde a: 322 metros de tubería de 6 in, 585 metros de tubería de 8 in, 306 metros de tubería de 10 in, 305 metros de

tubería de 12 in y 751 metros de tubería de 20in. La longitud de 2269 metros de tubería corresponde al 3.5 % de las tuberías instaladas en el sector.

Las presiones que oscilaban inicialmente entre 60 y 100 m.c.a fueron disminuidas a un intervalo entre 40 y 60 m.c.a. De manera similar las presiones entre 40 y 60 m.c.a fueron disminuidas a un intervalo entre 15 y 40 m.c.a. En este caso en ninguno de los nodos que tienen demanda se afecta la presión mínima de 15 m.c.a. Esta reducción de presiones contribuye a tener menores pérdidas en el sector ya que el caudal de pérdidas por fugas es función de la presión.

7. CONCLUSIONES

7.1. Con respecto a la información geográfica del amb S.A. ESP

Con el objetivo de implementar el modelo de gestión de las tuberías en redes de distribución de agua potable, se hace necesario que el amb S.A. ESP, consolidar los dominios, los atributos y tipo de datos de la cobertura de daños para los diferentes años. Se encontró que a pesar de la existencia de unos atributos mínimos se presentaba diferentes campos de los dominios por año, así como diferentes atributos para la misma actividad de mantenimiento lo que hizo necesaria la unificación de dichos atributos. Se sugiere la creación de un modelo de datos para la cobertura de los daños según el modelo de gestión.

7.2. Con respecto al modelo de gestión de mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable

Se creó una modelo de gestión del mantenimiento y renovación de tuberías de manera proactiva y eficiente a partir de información geográfica y registro de daños de las redes de distribución; mediante la implementación y alineación de tres modelos de mejoramiento: dos modelos estadísticos y un modelo de análisis técnico del sistema, lo que lo convierte en una herramienta robusta para la gestión del mantenimiento y reposición de redes de acueducto, ya que permite direccionar el recurso económico y humano en los planes de renovación de tuberías futuros.

De manera similar, el modelo de gestión al tener un componente de análisis hidráulico del sistema, permite realizar una programación organizada de la reposición; mejorando la confiabilidad, disminuyendo las fugas y uniformizando el plano de presiones de las redes.

7.3. Con respecto a la conceptualización de relaciones espaciales

Se encontró según el test de autocorrelación espacial que la distancia de banda fija para el fenómeno de daños en las tuberías en la red de distribución de la ciudad de Bucaramanga, corresponde a valores entre 2759 y 3745 metros. Valores que deben ser considerados en análisis similares de conceptualización de relaciones espaciales.

7.4. Con respecto al análisis de puntos calientes

Se identificó cualitativamente con un nivel de confianza del 95%, existe concentración de daños en los distritos Estadio, Morro Alto, y Norte. Distritos con un color más rojo en el análisis de Puntos calientes.

7.5. Con respecto al ranking cuantitativo de los distritos hidráulicos

Se propuso un ranking cuantitativo para clasificar los distritos hidráulicos basada en el valor promedio del puntaje $Z(G_i^*)$ a lo largo del distrito y un valor r que es una relación entre el número de eventos correlacionados espacialmente en el distrito (i) dividido entre el número de eventos correlacionados totales. Esta relación. Se encontró que los cinco (5) distritos que necesitan mayor prioridad de mantenimiento corresponden al Distrito Estadio, Distrito Norte, Distrito La Flora y Distrito Morro Alto y Distrito Bienestar. La función propuesta es la siguiente:

$$f(\overline{Z}(G_i^*)) = \overline{Z}(G_i^*) * r$$

7.6. Con respecto al análisis estadístico bayesiano

El análisis estadístico determinar aquellas características que posiblemente presentan una tasa de falla alta, usando una relación diagnóstica $D(x)$.

Según este análisis bayesiano, la mayor probabilidad (muy alta) correspondió al estado de condición: Edad entre 20 y 40 años, Material HG (Hierro Galvanizado), Diámetro menor a 4" y longitud mayor a 45m.

7.7. Con respecto al análisis de confiabilidad

Los resultados de este análisis muestran que para un porcentaje de importancia del 95% al Índice de Resiliencia y de 5% al coeficiente de uniformidad de presiones se obtienen los resultados más favorables del análisis, los cuales están asociados a menores costos de renovación cercanos a los 600 millones de pesos, una recuperación del costo del agua fugada correspondiente a 860 millones de pesos por año y una disminución del estado de presiones promedio el cual pasa de un estado inicial de 48 m.c.a en promedio a un valor de 40.7 m.c.a para el cambio 16 y de 42.7 en el cambio 50.

7.8. Con respecto a los planos de presiones y a las tuberías a optimizar

Se encontró que se deben renovar 2269 metros de tubería existente para el distrito hidráulico de Morro Alto objeto del análisis. La distribución de diámetros de la tubería corresponde a: 322 metros de tubería de 6 in, 585 metros de tubería de 8 in, 306 metros de tubería de 10 in, 305 metros de tubería de 12 in y 751 metros de tubería de 20in. La longitud de 2269 metros de tubería corresponde al 3.5 % de las tuberías instaladas en el sector.

7.9. Con respecto a la presión promedio y a la uniformización de presiones

Se realizó una optimización entre las presiones que oscilaban inicialmente entre 60 y 100 m.c.a. Las cuales fueron disminuidas a un intervalo entre 40 y 60 m.c.a. De manera similar las presiones entre 40 y 60 m.c.a fueron disminuidas a un intervalo entre 15 y 40 m.c.a. Cabe aclarar que esta reducción en la presión no genera un deterioro en la calidad del servicio de los usuarios, sino que contribuye a tener menores pérdidas en el sector debido a la relación directamente proporcional entre el caudal y la presión.

8. RECOMENDACIONES

8.1 Con respecto a la aplicación de la metodología

Es importante que el amb S.A. ESP implemente la metodología propuesta, pues es una herramienta que permite direccionar los costos de renovación de manera organizada y priorizada. A su vez es necesario que se destine recurso económico y humano para la realización de la metodología en los distritos con mayor necesidad de mantenimiento.

8.2 Con respecto a la información geográfica del amb S.A. ESP

Es necesario que el amb S.A. ESP incorpore dentro de su información geográfica la información correspondiente a las acometidas, pues se encontró que el tipo de daño *Tube roto estallado-acometida* corresponde a una de las causas más importantes en las redes de distribución.

8.3 Con respecto a la conceptualización de relaciones espaciales

Es necesario establecer y definir relaciones de interdependencia espacial menos simples (o más complejas) con base en la ciencia propia del problema de la ocurrencia de daños (Regímenes de Presión, cortes de agua, desaire de tuberías, etc). Asimismo, se hace importante correlacionar los daños no solo por la posición espacial sino por la también dentro de la magnitud del tiempo. Es decir realizar análisis de agrupación de espacio-tiempo y saber si existe correlación entre los daños según el instante en el que ocurrieron.

8.4 Con respecto al análisis de puntos calientes

Se recomienda aplicar el estadístico I_i de Moran para complementar la información obtenida de la prueba de autocorrelación hecha con el estadístico G_i^* de Gedis-Ord.

8.5 Con respecto al análisis estadístico bayesiano

Se debe probar o refutar la hipótesis de independencia de los eventos de la prueba bayesiana (diámetros, longitudes, edades, materiales). Se propone en primera instancia hacer esto mediante 4 test de autocorrelación espacial (uno para cada variable) y una posterior superposición de mapas, cada uno como una capa.

8.6 Con respecto al análisis de confiabilidad

Se recomienda incorporar criterios de parada para el algoritmo, es decir que no solo se base en el número de cambios sino en el menor costo de renovación y en el mayor costo de agua fugada recuperada.

BIBLIOGRAFÍA

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. *Water resources research*, 1977, vol. 13, no 6, p. 885-900.

ARAQUE FUENTES, D. Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). 2006. Universidad de los Andes.

ATHAN, Timothy Ward; PAPALAMBROS, Panos Y. A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization. *Engineering Optimization*, 1996, vol. 27, no 2, p. 155-176.

CASTILLO, Diana Jeanneth del Pilar Rodriguez. Modelar la Concentración de la Tierra en Colombia Mediante Modelos Económicos Espaciales. 2010. MLA

CELEMÍN, Juan Pablo. Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial: Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 2009, vol. 18, no 1, p. 11-31.

CHEUNG, Peter Batista. Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo. 2004. Tesis Doctoral. Universidade de São Paulo.

CLIFF, Andrew David; ORD, J. Keith. *Spatial processes: models & applications*. London: Pion, 1981.

FENNER, R. A. Approaches to sewer maintenance: a review. *Urban water*, 2000, vol. 2, no 4, p. 343-356.

FENNER, R. A.; SWEETING, L. A decision support model for the rehabilitation of "non-critical" sewers. *Water Science and Technology*, 1999, vol. 39, no 9, p. 193-200.

GETIS, Arthur. A history of the concept of spatial autocorrelation: A geographer's perspective. *Geographical Analysis*, 2008, vol. 40, no 3, p. 297-309.

GETIS, Arthur; ORD, J. Keith. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24, no 3, p. 189-206.

GIRALDO HENAO, Ramón. *Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicación*. Bogotá: Departamento de estadística. Universidad Nacional de Colombia, 2002.

GUZMAN, ALONSO; DANIEL, CARLOS. Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de

abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto.(México). 2010. Tesis Doctoral.

HAINING, Robert P. Spatial data analysis: theory and practice. Cambridge University Press, 2003.

HUBERT, Lawrence James; GOLLEDGE, Reg G.; COSTANZO, Carmen M. Generalized procedures for evaluating spatial autocorrelation. Geographical Analysis, 1981, vol. 13, no 3, p. 224-233.

ISAAKS, Edward H.; SRIVASTAVA, R. Mohan. An introduction to applied geostatistics. 1989.

KLEINER, Yehuda; RAJANI, Balvant. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. Urban water, 2001, vol. 3, no 3, p. 131-150.

KULKARNI, Ram; GOLABI, K.; CHUANG, J. Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast iron gas piping systems, phase I. 1986. Gas Research Institute, PB87-114112, Chicago.

MITCHELL, Andy. The ESRI guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. Redlands. 2005.

Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica, p. 246. Disponible libre formato Pdf en: <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html> [Consulta 12/07/2015]

ORD, J. Keith; GETIS, Arthur. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. Geographical analysis, 1995, vol. 27, no 4, p. 286-306.

ORMSBEE, Lindell; KESSLER, Avner. Optimal Upgrading of Hydraulic-Network Reliability. Journal of Water Resources Planning and Management, 1990.

PRASAD, T.D & PARK N-S, Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. En: Journal of Water Resources Planning and Management. Vol.130, Issue 1 (2004); p 73-82.

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) - Ministerio de Vivienda, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

SALDARRIAGA J.G, OCHOA S, MORENO M, ROMERO N & CORTÉS O. Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria. En: Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes. #31, (2010); p 7-15.

SALDARRIAGA, J et al, Diseño de redes de distribución incluyendo el concepto de resiliencia, XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 2008

TODINI, Ezio. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2000, vol. 2, no 2, p. 115-122.

TORRES M, Sergio. Optimización del Índice de Resiliencia y Uniformización de la Presión como criterios para renovar tuberías en Redes de Distribución De Acueductos, 2011. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

TUNG, Yeou-Koung. Evaluation of water distribution network reliability. En *Hydraulics and hydrology in the small computer age*. ASCE, 1985. p. 359-364.

WALSKI, T. M., et al. Discussion of the paper "Improved design of 'Anytown' distribution network using structured messy genetic algorithms." En *Urban Water*, 1999, vol. 1, no 2, p. 265-268.

WALSKI, Thomas M., et al. Battle of the network models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1987, vol. 113, no 2, p. 191-203.

WARRICK, A. W.; MYERS, D. E. Optimization of sampling locations for variogram calculations. *Water Resources Research*, 1987, vol. 23, no 3, p. 496-500.

WATER, NEW ENGLAND INTERSTATE. Optimizing Operation, Maintenance, AND Rehabilitation OF Sanitary Sewer Collection Systems. 2003.

WATSON, Tim, et al. Maintenance of Water Distribution Systems. En *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand*, University of Canterbury, New Zealand. 2001. p. 57-66.

XU, Chengchao; GOULTER, Ian C. Probabilistic model for water distribution reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1998, vol. 124, no 4, p. 218-228.

XU, Chengchao; GOULTER, Ian C. Reliability-based optimal design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1999, vol. 125, no 6, p. 352-362.

ANEXO A ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD HIDRÁULICA

- **Objetivos**

1. Aumentar de manera óptima el Índice de Resiliencia (I_R)
2. Aumentar de manera óptima el Coeficiente de Uniformidad de presiones (CU) de Araque y Saldarriaga (2006):

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} P_j}{n_n \max\{P_j\}} = \frac{\bar{P}}{\max\{P_j\}}$$

Donde P_j es la presión en el nodo j , n_n el número de nodos y \bar{P} la presión promedio en los nodos. Se puede ver que,

$$\bar{P} \leq \max\{P_j\} \quad \text{entonces} \quad 0 \leq CU \leq 1$$

- **Función objetivo.** Con los dos objetivos anteriores se construye una función que los combina. Se elige la suma ponderada exponencial como función objetivo.

$$FO = (e^{p \cdot w_1} - 1)e^{p \cdot I_R} + (e^{p \cdot w_2} - 1)e^{p \cdot CU}$$

Donde I_R es el índice de resiliencia de la red, CU el coeficiente de uniformidad de presiones, w_1 el peso o importancia que se da a maximizar I_R , w_2 el peso o importancia que se da a maximizar CU , cumpliendo que $w_1 + w_2 = 1$ y $w_{1,2} \geq 0$. p es el parámetro del método de la suma ponderada exponencial, de modo que grandes valores benefician el desempeño del método, pero en contraposición, grandes valores de pueden conducir a desbordamiento numérico, en virtud de su condición de exponente. Para evitar caer en errores de desbordamiento numérico, el valor máximo que podrá tomar p debe ser aproximadamente 350. Este valor está deducido teniendo en cuenta el tipo de dato numérico que puede albergar mayores cantidades (tipo double) para Visual Basic (lenguaje en el que se desarrolla la el algoritmo).

- **Costos y Beneficios considerados.**

1. Ahorro en el costo de agua no contabilizada

El costo del agua no contabilizada en un periodo de tiempo T es:

$$CostoANC(T) = [V_{ap}(T) - V_{af}(T)]K_{agua}$$

Donde $V_{ap}(T)$ y $V_{af}(T)$ son el volumen de agua producida y facturada en el periodo de tiempo T respectivamente y K_{agua} el costo de un metro cúbico de agua. Por lo tanto el ahorro en el agua no contabilizada para un periodo de tiempo T luego de aplicar una reducción en el nivel de presiones es,

$$AhorroANC(T) = CostoANC(T)_o - CostoANC(T)_A$$

Donde $CostoANC(T)_o$ es el costo en el agua no contabilizada para el periodo de tiempo T, antes de aplicar la reducción de fugas. $CostoANC(T)_A$ es el mismo anterior pero después de aplicar la reducción de fugas.

2. Costo de adquisición e implantación de tuberías

La función general para este costo es:

$$C_j = K_{costo} L_j (D_j)^{n_{costo}}$$

Donde C_j es el costo de renovación de una tubería j, L_j y D_j la longitud y diámetro de la misma respectivamente. K_{costo} y n_{costo} son el coeficiente y exponente de costo respectivamente, obtenidos mediante un análisis de regresión hecho a las parejas de valores $(\frac{D_j}{L_j}, C_j)$ que a su vez dependen del contexto donde tiene lugar la renovación.

• Restricciones.

1. La presión mínima en la red debe ser igual a la mínima permitida:

$$P_{min}^{red} \geq P_{min}$$

2. El costo debe filtrar aquellas soluciones que presenten un niveles de evaluación económicos no apropiados

- **Algoritmo.**

1. Asignar las variables de entrada

- P_{min} y D_{max} son presión mínima y diámetro máximo respectivamente.
- *Rugosidad de las nuevas tuberías a implantar*
- K_{costo} y n_{costo} (parámetros de la función de costo).
- C y a (parámetros de emisores).
- K_{agua} (el costo de entregar un metro cúbico de agua potabilizado).
- p y w_1 (parámetros del método de optimización).
- *Numero de Cambios* (número de modificaciones a los diámetros que se desean obtener. Esta variable determina la terminación del algoritmo)

2. Hallar la presión mínima que ocurre en la red (P_{min}^{obt}) y su instante correspondiente. Calcular e imprimir I_R y CU en dicho instante.

3. Calcular e imprimir: Costo del agua no contabilizada anual, Rango de Presiones, Presión Promedio en los nodos de consumo, y H_e (altura piezométrica) del primer embalse.

4. *Para $e = 1$ hasta Numero de embalses:*

$$H_e = H_e - (P_{min}^{obt} - P_{min})$$

H_e es la altura piezométrica del embalse e. Esta ecuación ajusta la altura total de cada embalse y de esta manera se aplica la restricción de establecer la presión mínima permitida en el nodo de menor presión encontrado en la red.

5. Calcular e imprimir I_R y CU (ambos en el instante de presión mínima). Calcular e imprimir: Costo del agua no contabilizada anual, Rango de Presiones, Presión Promedio en los nodos de consumo, y H_e del primer embalse.

6. *Para $j = 1$ hasta $j = \text{Número de Tubos}$*

Aumentar D_j al siguiente comercial mayor D_j^+

Si $D_j^+ \leq D_{max}$ Ejecute (i), (ii), (iii) y (iv)

(i) Calcular la mínima presión obtenida P_{min}^{obt} en la red.

(ii) Calcular e imprimir I_R y CU (en instante de presión mínima)

- (iii) Calcular la función objetivo y llamar a su valor FO_j
- (iv) Restablecer el diámetro D_j^+ al que antes tenía, D_j

7. Calcular FO^{max} y su correspondiente tubería k que lo produjo.
8. Aumentar definitivamente D_k al siguiente comercial mayor D_k^+ . Esto significa una nueva modificación.
9. Imprimir los valores I_R y CU derivados del incremento del diámetro de la tubería k.
10. Ejecutar 4). En este caso P_{min}^{obt} corresponde a la mínima presión obtenida al incrementar el diámetro de la tubería k. Con esto se disminuye el nivel general de las presiones ocasionado por el aumento del diámetro de la tubería k.
11. Calcular e imprimir: Costo del agua no contabilizada anual Rango de Presiones, Presión Promedio en los nodos de consumo, H_e del primer embalse y Costo de Renovación.
12. Repetir 6) a 11) hasta que el número de modificaciones efectuadas sea igual al número de cambios establecido.

El paso 4) corresponde al ajuste previo del nivel de presiones para garantizar un valor mínimo de presión igual al mínimo permitido y produce el punto de partida del método de optimización. Así mismo constituye un punto de inflexión en cuanto al nivel presiones, ya que se puede pasar a menores niveles (si la red presenta en principio excesos de presión) o a mayores niveles (si la red presenta en principio déficit de presiones).

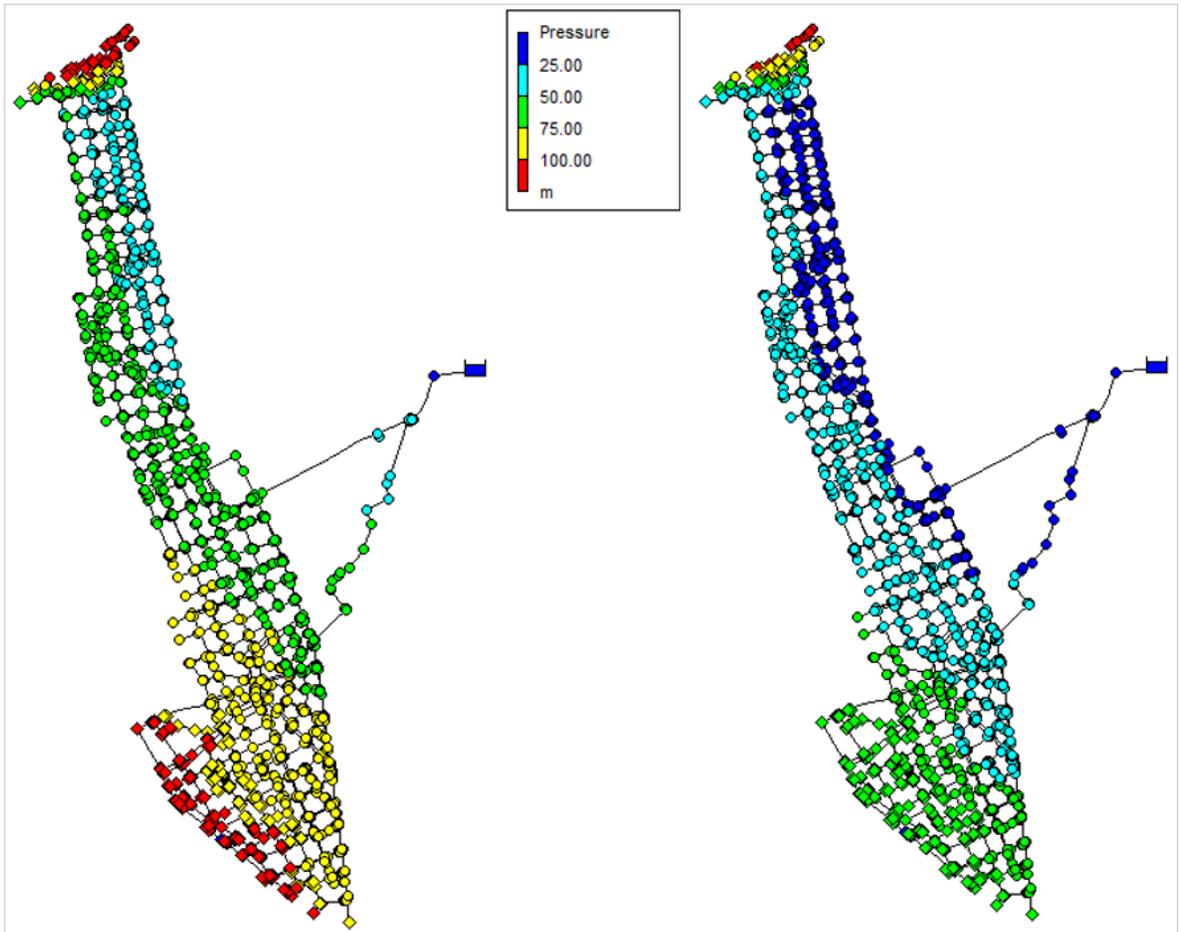
ANEXO B RESULTADOS ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD HIDRÁULICA

Cuadro 12. Listado de cambios por confiabilidad hidráulica - Morro Alto

W ₁ = 0.05 (5% para Ir)			W ₁ = 0.5 (50% para Ir)			W ₁ = 0.95 (95% para Ir)		
Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro [mm]	Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro [mm]	Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro [mm]
1	34777	200	1	34777	200	1	34777	200
2	55806	450	2	55806	450	2	34777	250
3	30153	200	3	34777	250	3	55806	450
4	28969	75	4	26385	200	4	26385	200
5	34777	250	5	26381	200	5	26381	200
6	25848	450	6	25972	200	6	25972	200
7	55806	500	7	30153	200	7	26199	150
8	26385	200	8	28969	75	8	26286	150
9	25972	200	9	26199	150	9	26066	150
10	26381	200	10	26066	150	10	19102	200
11	56920	150	11	26286	150	11	23380	150
12	54059	200	12	25848	450	12	19110	200
13	25848	500	13	55806	500	13	19109	200
14	55807	400	14	56920	150	14	34777	300
15	34777	300	15	54059	200	15	19101	200
16	55807	450	16	25848	500	16	25848	450
17	54059	250	17	55807	400	17	26345	75
18	30153	250	18	34777	300	18	26345	100
19	53892	200	19	55807	450	19	55806	500
20	53875	300	20	54059	250	20	30153	200
21	18092	75	21	30153	250	21	26385	250
22	26385	250	22	53892	200	22	50921	150
23	56920	200	23	53875	300	23	37597	150
24	26381	250	24	19102	200	24	26286	200
25	25972	250	25	23380	150	25	26199	200
26	18093	75	26	19110	200	26	26345	150
27	55807	500	27	19109	200	27	26066	200
28	57337	75	28	19101	200	28	26381	250
29	5690	300	29	26385	250	29	25972	250
30	28969	100	30	26345	75	30	8195	75
31	54059	300	31	26345	100	31	23378	150
32	34777	350	32	50921	150	32	25848	500
33	30471	200	33	8195	75	33	26418	150
34	39160	200	34	26199	200	34	23380	200
35	30153	300	35	26286	200	35	34777	350
36	34773	300	36	37597	150	36	56920	150
37	53927	300	37	26345	150	37	30471	200
38	27442	75	38	26066	200	38	55807	400
39	53875	350	39	23378	150	39	50921	200
40	54097	300	40	25972	250	40	54059	200
41	48704	450	41	26381	250	41	55807	450
42	19363	400	42	23380	200	42	19102	250
43	19363	450	43	26418	150	43	52680	150
44	19363	500	44	8195	100	44	19110	250
45	57337	100	45	30471	200	45	19109	250
46	34773	350	46	19102	250	46	23394	200
47	53892	250	47	19110	250	47	8195	100
48	29477	150	48	52680	150	48	19101	250
49	26385	300	49	50921	200	49	7824	150
50	54097	350	50	19101	250	50	26034	150

Fuente: El Autor

Figura 37. Presiones antes y después del análisis de confiabilidad - Morro Alto



Fuente: El Autor

ANEXO C RESUMEN ANALÍTICO

Título del proyecto	Modelo de gestión para el mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable
Presidente	BOADA RODRIGUEZ, Alberto aboadar@igac.gov.co Magister en Sistemas de Geo información para Aplicaciones Urbanas, ITC de Holanda, Oficina CIAF, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
Tipo de documento	Trabajo de grado.
Referencia documento	CASTAÑEDA GALVIS, Luis Fernando. Modelo de gestión para el mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable. Manizales, 2015, 116 p. Trabajo de grado (Magister en Tecnologías de la Información Geográfica). Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería
Institución	Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales.
Palabras claves	Redes de distribución de Agua, Daños, Sistema de Información Geográfica, Mantenimiento Proactivo, Análisis de Puntos Calientes, Teorema de Bayes.
Descripción	<p>Se expone una metodología para el mantenimiento y renovación de tuberías de manera proactiva y eficiente a partir de información geográfica y registro de daños de las redes de distribución; mediante la implementación y alineación de tres modelos de mejoramiento: dos modelos estadísticos y un modelo de análisis técnico del sistema.</p> <p>El primer modelo (estadístico) usa la información geográfica y el registro de daños del total de la red de tuberías de una Ciudad. Es el componente macro y de mayor importancia de la metodología. Mediante un análisis de puntos calientes (<i>Hot-spots</i>), aplicando la</p>

relación de interdependencia espacial de distancia de banda; se averigua la autocorrelación espacial de los daños, para con ello precisar los distritos hidráulicos que contienen, relativamente, mayor cantidad de puntos calientes. Así, en primera instancia, se establece un Ranking de distritos en donde se identifica la prioridad de mantenimiento y renovación.

Seguidamente se incorpora para el(los) distrito(s) prioritarios un modelo estadístico fundamentado en un análisis bayesiano, donde a partir del registro de daños del distrito, se predicen probabilidades de daño de cada tubería, según características que se observen en la misma: diámetro, edad, material y longitud.

Finalmente se incorpora, también para el(los) distrito(s) prioritario(s), un modelo de análisis técnico del sistema, donde a partir del modelo hidráulico se prioriza la renovación de aquellas tuberías que de manera óptima mejoran la confiabilidad hidráulica de la red, cuidando simultáneamente del costo y la presión.

Se aplica la metodología a la Ciudad de Bucaramanga cuya red de distribución está subdividida en 39 distritos hidráulicos. Del análisis de Hot-Spots, se observa siempre los mismos 3 distritos prioritarios. Se elige cualitativamente el más prioritario para implementar los dos modelos subsiguientes, y así se direcciona el mantenimiento a 4 kilómetros de tuberías, correspondientes al 6.15% de la red de tuberías del distrito.

Fuentes

WATSON, Tim, et al. Maintenance of Water Distribution Systems. En Proceedings of the 36th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, University of Canterbury, New Zealand. 2001. p. 57-66.

GUZMAN, ALONSO; DANIEL, CARLOS. Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto.(México). 2010. Tesis Doctoral.

FENNER, R. A. Approaches to sewer maintenance: a

review. *Urban water*, 2000, vol. 2, no 4, p. 343-356.
Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) - Ministerio de Vivienda, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.

KLEINER, Yehuda; RAJANI, Balvant. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. *Urban water*, 2001, vol. 3, no 3, p. 131-150.

KULKARNI, Ram; GOLABI, K.; CHUANG, J. Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast iron gas piping systems, phase I. 1986. Gas Research Institute, PB87-114112, Chicago.

ORD, J. Keith; GETIS, Arthur. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 1995, vol. 27, no 4, p. 286-306.

GETIS, Arthur; ORD, J. Keith. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24, no 3, p. 189-206.

GETIS, Arthur. A history of the concept of spatial autocorrelation: A geographer's perspective. *Geographical Analysis*, 2008, vol. 40, no 3, p. 297-309.

MITCHELL, Andy. *The ESRI guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. Redlands. 2005.

CASTILLO, Diana Jeanneth del Pilar Rodriguez. *Modelar la Concentración de la Tierra en Colombia Mediante Modelos Económicos Espaciales*. 2010. MLA

ARAQUE FUENTES, D. Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). 2006. Universidad de los Andes.

TODINI, Ezio. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2000, vol. 2, no 2, p. 115-122.

Contenido

Los capítulos de Introducción, área problemática y justificación, básicamente exponen la importancia y el reto del mantenimiento y renovación proactivo de las redes de distribución de agua. Se conceptualiza la metodología propuesta como un modelo que busca ser integral y que para ello integra tres análisis diferentes: Estadística Espacial, Bayesiano y de Confiabilidad hidráulica. Se presenta la justificación para el desarrollo de metodologías proactivas de mantenimiento y renovación, desde el punto de vista normativo y económico.

Seguidamente el marco teórico describe los conceptos relevantes de cada uno de los tres análisis que componen la metodología. Se inicia exponiendo algunos conceptos de Estadística Espacial: autocorrelación espacial, prueba o detección (*test*) de autocorrelación espacial, relaciones de interdependencia espacial, matriz de contigüidad, estadístico G_i^* y prueba de autocorrelación espacial con el estadístico G_i^* . Continúa el marco teórico presentando algunos conceptos útiles en estadística Bayesiana y deduciendo la fórmula para al cálculo de probabilidad de daño por tubería. Seguidamente se presenta el concepto de confiabilidad hidráulica desde el punto de vista normativo y técnico. Concluye el marco teórico presentando algunos antecedentes relevantes a la metodología formulada: se expone la no existencia de casos de aplicación de test de autocorrelación espacial a la distribución de daños de tuberías, se presenta un antecedente de aplicación de estadística bayesiana al análisis de fallo en tuberías de gas y otros.

Metodología

Se presenta la metodología como un procedimiento de cuatro fases descritas en un diagrama de flujo. Dos fases iniciales previas: Recolección y organización de información, determinación de tipos de daño significativos. Una tercera fase que aplica el test G_i^* para el análisis de la autocorrelación espacial de los daños y así identificar la(s) zona(s) que presentan mayor incidencia de daños. Definida(s) la(s) zona(s),

ésta(s) será(n) objeto de los dos análisis subsiguientes, con el fin de aumentar la escala de análisis y priorización del mantenimiento y renovación. La fase 4 aplica el análisis bayesiano y el análisis de confiabilidad hidráulica para producir un mapa de probabilidades de fallo y prioridades de cambio, respectivamente. Finalmente se combinan cualitativamente estos dos mapas para determinar las líneas de tubería prioritarias por mantenimiento o renovación.

Conclusiones

Se expone una metodología para el mantenimiento y renovación de tuberías de manera proactiva y eficiente a partir de información geográfica y registro de daños de las redes de distribución; mediante la implementación y alineación de tres modelos de mejoramiento: dos modelos estadísticos y un modelo de análisis técnico del sistema.

El primer modelo (estadístico) usa la información geográfica y el registro de daños del total de la red de tuberías de una Ciudad. Es el componente macro y de mayor importancia de la metodología. Mediante un análisis de Puntos Calientes (*Hot-spots*), aplicando la relación de interdependencia espacial de distancia de banda; se averigua la autocorrelación espacial de los daños, para con ello precisar los distritos hidráulicos que contienen, relativamente, mayor cantidad de puntos calientes. Así, en primera instancia, se establece un *Ranking* de distritos en donde se identifica la prioridad de mantenimiento y renovación.

Seguidamente se incorpora para el(los) distrito(s) prioritarios un modelo estadístico fundamentado en un análisis bayesiano, donde a partir del registro de daños del distrito, se predicen probabilidades de daño de cada tubería, según características que se observen en la misma: diámetro, edad, material y longitud.

Finalmente se incorpora, también para el(los) distrito(s) prioritario(s), un modelo de análisis técnico del sistema, donde a partir del modelo hidráulico se prioriza la renovación de aquellas tuberías que de manera óptima mejoran la confiabilidad hidráulica de la red, cuidando simultáneamente del costo y la presión.

Se aplica la metodología a la Ciudad de Bucaramanga cuya red de distribución está subdividida en 39 distritos hidráulicos. Del análisis de *Hot-Spots*, se observa siempre los mismos 4 distritos prioritarios. Se elige cualitativamente el más prioritario para implementar los dos modelos subsiguientes, y así se direcciona el mantenimiento a 2.3 kilómetros de tuberías, correspondientes al 3.5% de la red de tuberías del distrito.

Anexos

ANEXO A. Describe el algoritmo empleado para el análisis de confiabilidad hidráulica.

ANEXO B. Presenta algunos resultados de la aplicación del algoritmo de análisis de confiabilidad hidráulica: Lista de Cambios y mapa de presiones.